



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF BUILDING TESTING

# KALIBRACE NEPŘÍMÝCH METOD PRO ZJIŠŤOVÁNÍ VLASTNOSTÍ ALKALICKY AKTIVOVANÝCH BETONŮ

CALIBRATION OF INDIRECT METHODS FOR MEASUREMENT OF PROPERTIES OF ALKALI  
ACTIVATED CONCRETE

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

BC. PAVEL VRBA

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. VLASTIMIL BÍLEK, Ph.D.

BRNO 2014



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	N3607 Stavební inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
<b>Studijní obor</b>	3607T009 Konstrukce a dopravní stavby
<b>Pracoviště</b>	Ústav stavebního zkušebnictví

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>Diplomant</b>	Bc. PAVEL VRBA
<b>Název</b>	Kalibrace nepřímých metod pro zjišťování vlastností alkalicky aktivovaných betonů
<b>Vedoucí diplomové práce</b>	Ing. Vlastimil Bílek, Ph.D.
<b>Datum zadání diplomové práce</b>	31. 3. 2013
<b>Datum odevzdání diplomové práce</b>	17. 1. 2014

V Brně dne 31. 3. 2013

prof. Ing. Leonard Hobst, CSc.  
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.  
Děkan Fakulty stavební VUT



## Podklady a literatura

Shi, C., Krivenko, P.V., Roy, D.: Alkali-Activated Cements and Concretes, Taylor&Francis 2006, ISBN I 0: 0-415-70004-3

Bílek, V.: Self-Compacting Alkali Activated Concrete for production of Concrete elements, 36th Conference on Our World in Concrete&Structures, Singapore, August 14-16, 2011

Adámek, J., Hobst, L., Cikrle, P., Schmid, P. Diagnostika stavebních konstrukcí. Studijní opora, VUT v Brně FAST, 2005.

Schmidt, P. s kol. Základy zkušebnictví. Brno, CERM, 2001.

ANTON, O., kolektiv autorů, Základy zkušebnictví, Brno, CERM, 2002.

Normy ČSN EN 206-1, ČSN EN 13791, ČSN EN 12504-1,2,3,4, ČSN ISO 6784, ČSN 73 2011, ČSN 73 1370-76 a navazující.

## Zásady pro vypracování

Teoretická část: Zpracování přehledu použitých zkušebních metod - zaměření na metodu ultrazvukovou, tvrdoměrnou odrazovou, pevnost v tlaku, statický modul pružnosti.

Praktická část: Vytvoření kalibračních vztahů pro stanovení pevnosti v tlaku a statického modulu pružnosti alkalicky aktivovaných betonů různé pevnosti pomocí nepřímých metod.

Zhotovení vzorků v rozsahu krychlí ( $d = 150 \text{ mm}$ ) a 18 hranolů ( $d = 100 \times 100 \times 400 \text{ mm}$ ).

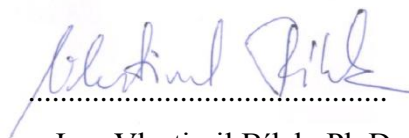
Provedení měření tvrdoměrem Schmidt N a SilverSchmidt PC N a ultrazvukových měření ve stáří 1, 2, 7 a 28 dní. Stanovení pevnosti v tlaku na krychlích a statického modulu pružnosti na hranolech (28 dní). Porovnání výsledků zkoušek a vyhodnocení kalibračních vztahů pro jednotlivé metody a jejich vzájemnou kombinaci.

Poznámka: Zkoušky v zatěžovacím lisu provede technik Ústavu stavebního zkušebnictví nebo ŽPSV.

## Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).



Ing. Vlastimil Bílek, Ph.D.  
Vedoucí diplomové práce

**Abstrakt**

Práce se zabývá tvorbou kalibračních vztahů pro stanovení pevnosti v tlaku, dynamického a statického modulu pružnosti alkalicky aktivovaného betonu pomocí nepřímých (nedestruktivních) metod.

O alkalicky aktivovaných betonech se pojednává jako o relativně novém materiálu použitém ve stavebnictví. Vykazují jiné vlastnosti než betony na bázi portlandského cementu. Proto se tedy modifikace obecného kalibračního vztahu jeví jako nezbytná. Čerstvý beton byl vyroben v provozu ŽPSV a.s., v závodě Uherský Ostroh ve třech směsích a vždy v počtu 18 krychlí a 3 trámce. Vzorky byly zkoušeny tvrdoměry Schmidt typu L a typu N, SilverSchmidt PC-N a ultrazvukem v 6 časových etapách po 3 tělesech. Poté byla stanovena pevnost v tlaku na krychlích. Statický modul pružnosti na hranolech byl stanoven ve stáří 28 dnů. Výsledkem jsou kalibrační vztahy pro stanovení vývoje pevnosti v tlaku a modulu pružnosti pro jednotlivé metody i jejich vzájemnou kombinaci.

**Abstract**

This work solves creation of calibration relations to determine cube compressive strength, dynamic and static elastic modulus of alkali-activated concrete by non-destructive methods.

Alkali-activated concrete is spoken of as a new material used in civil engineering. It shows different properties than normal concrete based on Portland cement. That's why the modification of common calibration relation seems necessary. Fresh concrete was made in the concrete plant ŽPSV a.s., Uherský Ostroh in three mixtures and always in the number of 18 cubes and 3 prisms. The samples were tested by impact hammer Schmidt type L, type N, SilverSchmidt PC-N and by ultrasound in 6 time periods of three specimens. After that, the cube compressive strength was determined. Status of static elastic modulus was determined in a time period of 28 days. The results are calibration relations to determine the progress of compressive strength and modulus of elasticity for each method and their combination.

**Klíčová slova**

alkalicky aktivovaný beton, kalibrační vztah, pevnost v tlaku, statický modul pružnosti, dynamický modul pružnosti, nedestruktivní metody, ultrazvuková impulsní metoda, tvrdoměrná odrazová metoda, lineární regrese, součinitel determinace, Poissonův součinitel, Schmidt L, Schmidt N, SilverSchmidt PC-N

**Keywords**

alkali activated concrete, calibration relationship, compressive strength, static modulus of elastic, dynamic modulus of elastic, nondestructive methods, ultrasonic pulse method, hardness tester method, linear regression analysis, coefficient of determination, Poisson's ratio, Schmidt L, Schmidt N, SilverSchmidt PC-N

**Bibliografická citace VŠKP**

VRBA, Pavel. *Kalibrace nepřímých metod pro zjišťování vlastností alkalicky aktivovaných betonů*. Brno, 2013. 75 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Ing. Vlastimil Bílek, Ph.D.

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne .....

.....

podpis autora

**Poděkování:**

Rád bych poděkoval svému školiteli Ing. Vlastimilu Bílkovi, Ph.D. a doktorandovi Ing. Daliborovi Kocábovi za jejich nápady, připomínky k práci a především za čas, který mi věnovali při konzultacích k dokončení mé závěrečné práce.

Dále bych rád poděkoval svým blízkým za jejich pevnou podporu a důvěru, nejen při tvorbě této práce, ale i během celého mého studia.

## Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVODNÍ ČÁST</b>	<b>9</b>
1.1	Úvod	9
1.2	CÍLE	10
<b>2</b>	<b>PŘEHLED POUŽITÝCH ZKUŠEBNÍCH NEDESTRUKTIVNÍCH METOD (NDT)</b>	<b>11</b>
2.1	ELEKTRODYNAMICKÉ METODY	11
2.1.1	Ultrazvuková impulsová metoda průchodová	11
2.1.2	Rezonanční metoda	13
2.2	TVRDOMĚRNÁ ODRAZOVÁ METODA	15
2.2.1	Tvrdomost	15
2.2.2	Popis klasického Schmidtova tvrdoměru	15
2.2.3	Popis elektronického Schmidtova tvrdoměru PC-N	16
2.2.4	Faktory ovlivňující tvrdoměrné měření	19
2.2.5	Karbonatace u alkalicky aktivovaných betonů	20
<b>3</b>	<b>PŘEHLED POUŽITÝCH DESTRUKTIVNÍCH ZKUŠEBNÍCH METOD (DT)</b>	<b>22</b>
3.1	METODA STANOVENÍ PEVNOSTI BETONU V TLAKU	22
3.1.1	Pevnost	22
3.1.2	Stanovení pevnosti betonu v tlaku zatěžovacím lisem	22
3.2	METODA STANOVENÍ STATICKÉHO MODULU PRUŽNOSTI BETONU V TLAKU	23
3.2.1	Modul pružnosti	23
3.2.2	Stanovení statického modulu pružnosti	24
<b>4</b>	<b>VZÁJEMNÁ KOMBINACE NDT A DT ZKUŠEBNÍCH METOD</b>	<b>25</b>
4.1	MĚŘENÍ NA ZKUŠEBNÍCH TĚLESECH	25
4.2	KALIBRAČNÍ VZTAHY	26
4.2.1	Upřesnění kalibračního vztahu dle ČSN 73 1370	27
4.2.2	Lineární regrese	27
<b>5</b>	<b>MATERIÁLY A EXPERIMENTÁLNÍ POSTUPY</b>	<b>29</b>
5.1	IDENTIFIKACE BETONU	29
5.2	METODIKA ZKOUŠENÍ	30
5.2.1	Příprava forem pro zkušební tělesa	30
5.2.2	Postupy zkoušení v laboratoři	31
5.2.3	Postup zkoušení na hotovém dílci	33



<b>6</b>	<b>VÝSLEDKY LABORATORNÍCH ZKOUŠEK</b>	<b>36</b>
6.1	PEVNOST V TLAKU	36
6.2	MODUL PRUŽNOSTI	39
6.3	KALIBRAČNÍ VZTAHY PRO STANOVENÍ PEVNOSTI BETONU V TLAKU	43
6.3.1	Stanovení očekávané pevnosti betonu v tlaku $f_{ce,cube}$ z jednotlivých metod	45
6.3.2	Stanovení očekávané pevnosti betonu v tlaku $f_{ce,cube}$ z kombinace metod	52
6.3.3	Stanovení obecné rovnice očekávané pevnosti betonu v tlaku $f_{ce,cube}$	57
6.4	KALIBRAČNÍ VZTAHY PRO DYNAMICKÝ A STATICKÝ MODUL PRUŽNOSTI	60
6.4.1	Stanovení očekávaného dynamického modulu pružnosti v tlaku, tahu $E_{bue}$	61
6.4.2	Stanovení očekávaného statického modulu pružnosti v tlaku, tahu $E_{ce}$	63
<b>7</b>	<b>VÝSLEDKY ZKOUŠEK A MĚŘENÍ IN-SITU</b>	<b>65</b>
7.1	NAMĚŘENÉ ÚDAJE TVRDOMĚRNOU ODRAZOVOU METODOU	65
7.2	STANOVENÍ OČEKÁVANÉ KRYCHELNÉ PEVNOSTI SVODIDEL V TLAKU	66
<b>8</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>68</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b>	<b>69</b>
9.1	SKRIPTA A OPORY	69
9.2	NORMY	69
9.3	ČLÁNKY	70
9.4	WWW ZDROJE	70
<b>10</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ</b>	<b>71</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ, GRAFŮ A TABULEK</b>	<b>72</b>
11.1	SEZNAM OBRÁZKŮ	72
11.2	SEZNAM GRAFŮ	73
11.3	SEZNAM TABULEK	75

## 1 Úvodní část

### 1.1 Úvod

Současný stav životního prostředí a výsledky dlouhodobých výzkumů nás vedou k tomu, že se více než dříve zamýšlíme nad materiály, které ve stavebnictví používáme. Postupně tak dochází k vývoji materiálů nových, které jsou šetrné k životnímu prostředí jak ve fázi produkce, tak při jejich likvidaci.

Na základě testování historických stavebních materiálů bylo zjištěno, že některé látky, datované svým původem do období již před naším letopočtem, jsou vlastně na bázi geopolymerů, respektive, alkalicky aktivovaných systémů. V tomto období bylo při výstavbě, ale i výrobě užitných a uměleckých předmětů využíváno např. směsi vápna či přírodního sopečného popelu. Prvenství ve výzkumu těchto umělých směsí si připisuje ukrajinský profesor, pan Glukhovský, který se zabýval použitými pojivy ve staré římské a egyptské výstavbě. Na tyto poznatky v současnosti navazuje několik dalších studií se zaměřením na alkalicky aktivované materiály.

Mezi přednosti alkalicky aktivovaného betonu (dále jen AAB) v porovnání s betonem na bázi portlandského či směsného cementu, patří jejich šetrnost k životnímu prostředí v rámci jejich výroby, a zároveň odolnost vůči klimatickým a jiným negativním vlivům. Během výroby AAB se volí namísto cementového pojiva odpadní materiál vznikající při výrobě materiálu jiného a to představuje až šestkrát nižší uvolňování  $\text{CO}_2$  do ovzduší v porovnání s výrobou cementu. Typickým příkladem odpadního materiálu může být vysokopeční struska, která vzniká při výrobě oceli.

Princip alkalické aktivace spočívá v chemické reakci mezi tzv. aktivátory a materiálem k aktivaci. Aktivátory jsou uhličitany, hydroxidy a křemičitany alkalických kovů např. sodík či draslík. Materiál určený k aktivaci může být např. právě zmíněná struska či elektrárenský popílek. Dále je možné do směsi přidat různé příměsi nebo plastifikátory, které zlepšují fyzikální a mechanické vlastnosti.

Hlavními výhodami AAB z hlediska působení negativních vlivů jsou např. vysoká odolnost proti ohni, chemická odolnost či mrazuvzdornost.

Vzhledem k potenciálu využití těchto nových materiálů v oboru stavebnictví je našim záměrem poznávat jejich skutečné fyzikální mechanické vlastnosti, jako je např. pevnost v tlaku či statický modul pružnosti, a do jaké míry se liší v porovnání s betonem na bázi portlandského cementu. Volba správného testování umožňuje rovněž

tyto materiálové charakteristiky ověřit již na nově vybudovaných konstrukcích. Pokud se na zkušebních tělesech provede tzv. nedestruktivní měření, je možné následně vytvořit vlastní určující kalibrační vztah, pomocí kterého se výrazně upřesní měření provedené přímo na konstrukci.

### 1.2 Cíle

Jak již bylo výše zmíněno, v současnosti je stále větším záměrem zkoumání a testování vyvíjejících se, nových stavebních materiálů, konkrétně alkalicky aktivovaných betonů. Proto jsou v teoretické části práce popsány a shrnuty použité nedestruktivní metody se zaměřením na metodu ultrazvukovou a metodu tvrdoměrnou odrazovou. Rovněž jsou v této části popsány fyzikálně mechanické vlastnosti materiálu, jako je pevnost v tlaku a statický modul pružnosti.

V experimentální části této práce byly použity vzorky AAB vyrobené ze třech směsí lišících se mezi sebou ve vodním součiniteli, který se postupně redukoval. Počet vzorků byl v rozsahu 18 krychlí (o hraně 150 mm) testovaných v 6 časových etapách, a 3 hranoly (o rozměrech 100/100/400 mm) testované v 5 časových etapách pomocí ultrazvuku. Na hranolech bylo v časovém úseku 28 dní po betonáži provedeno tenzometrické měření pro zjištění statického modulu pružnosti.

Cílem experimentu je vytvořit kalibrační vztahy a jim odpovídající křivky pro stanovení pevnosti v tlaku  $f_{c,cube}$  a zároveň porovnat, do jaké míry se liší ve srovnání s kalibračním vztahem pro beton na bázi portlandského cementu.

Dalším cílem je prokázat, který z přístrojů použitých při nedestruktivním zkoušení vykazuje nejvyšší přesnost měření.

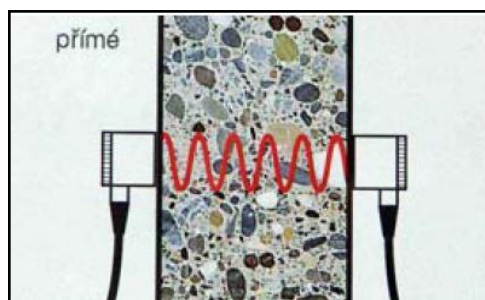
## 2 Přehled použitých zkušebních nedestruktivních metod (NDT)

### 2.1 Elektrodynamické metody

Tyto metody jsou založeny na principu snímání a vyhodnocování účinků mechanického vlnění, vyvolaného akustickým podnětem v daném zkoušeném materiálu.

#### 2.1.1 Ultrazvuková impulsová metoda průchodová

Dle [2-1] se jedná o nedestruktivní metodu, pomocí které se dá určit homogenita, případná vada nebo porucha daného vzorku, stavebního dílce či vada přímo v konstrukci. Podstatou této metody je opakované vysílání ultrazvukového (dále jen UZ) impulsu daným materiálem pomocí tzv. budiče a sondy, která tento impuls snímá. Kmitočty se pohybují v rozmezí od 20 kHz do 150 kHz (zcela výjimečně 500 kHz). V případě této práce byl použit kmitočet o frekvenci 82 kHz a způsob prozvučování byl *přímý* (viz Obr. 2-1).



**Obr. 2-1** Zvolený způsob prozvučování vzorku [1-1]

Během prozvučování vzorku přístroj zaznamenává čas průchodu UZ signálu  $t_L$  daným materiálem. Tento čas se z přístroje odečte a vyhodnotí se z něj rychlost šíření UZ vlnění  $v_L$  dle následujícího vzorce.

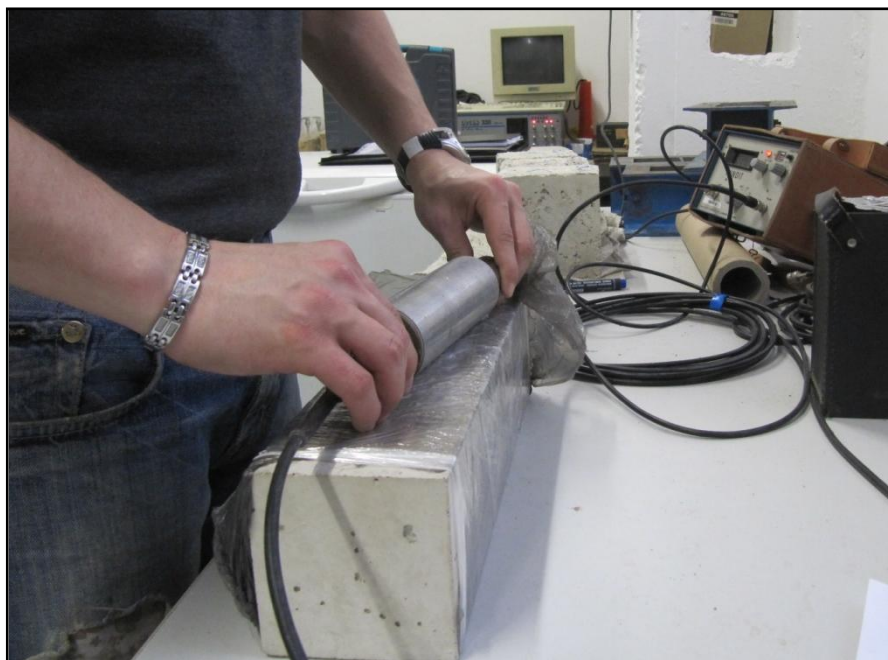
$$v_L = \frac{L}{t_L} \quad [\text{m.s}^{-1}]$$

kde  $L$  .....je měřená základna [m],

$t_L$  .....je měřený čas šíření UZ impulsu v betonu [ $\mu\text{s}$ ],

V průběhu měření je nutné sondu a budič pravidelně kalibrovat a použít vhodný akustický vazebný prostředek (plastelína), který zvýší přesnost měření.

Kalibrace se provádí prozvučením známého materiálu např. *etalonu*, u kterého je předepsaný čas šíření UZ impulsu 26,0  $\mu\text{s}$  (viz Obr. 2-2). Pokud dojde při měření v časové škále k prodloužení průchodu UZ vlnění, znamená to pravděpodobně, že se ve vzorku nachází defekt nebo se nejedná o homogenní materiál [2-1].



**Obr. 2-2** Kalibrace sond pomocí etalonu a měřicí zařízení PUNDIT

Mezi hlavní faktory, které ovlivňují rychlost UZ vlnění, patří především hutnost betonu a jeho modul pružnosti. Tyto charakteristiky jsou závislé např. na druhu a fyzikálních vlastnostech kameniva, vodním součiniteli nebo na stáří betonu. Při rostoucí pevnosti betonu dochází ke snižování přesnosti vztahu mezi rychlostí UZ impulsu a krychelnou pevností.

Výhodou UZ vlnění je schopnost šířit se i poměrně silnou vrstvou materiálu, a jedná se tedy o čistě nedestruktivní metodu. K nevýhodám patří naopak citlivost ultrazvuku na řadu vnějších vlivů [1-1].

### 2.1.1.1 Stanovení dynamického modulu pružnosti betonu $E_{bu}$ [1-2]

Hodnota dynamického modulu pružnosti v tlaku nebo tahu  $E_{bu}$  se vypočte dle vzorce

$$E_{bu} = \frac{\rho \cdot v_L^2}{k^2} \cdot 10^{-6} \quad [\text{MPa}]$$

kde  $\rho$  ..... je objemová hmotnost betonu [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ],

$v_L$  ..... je rychlost šíření UZ podélného vlnění [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$k$  ..... je koeficient rozměrnosti prostředí závislý na poměru mezi rozměry vzorku a násobku délky vlny [-]

V tomto případě spadal beton do trojrozměrného prostředí s označením  $k_3$ . Toto prostředí je závislé na hodnotě Poissonova součinitele  $\nu$ , který se určí rezonanční metodou, viz Kapitola 2.1.2. Hodnota koeficientu rozměrnosti se vypočte dle vzorce.

$$k_3 = \sqrt{\frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad [-]$$

### 2.1.1.2 Stanovení pevnosti betonu v tlaku $R_{be}$ [1-2]

Hodnotu pevnosti betonu v tlaku  $R_{be}$  s nezaručenou přesností lze stanovit z rychlosti šíření UZ impulsu  $v_L$  za pomoci následujícího kalibračního vztahu, dle normy ČSN 73 1370.

$$R_{be} = 9,9 \cdot v_{L3}^2 - 56 \cdot v_{L3} + 87,8 \quad [\text{MPa}]$$

kde  $v_{L3} \dots$  je rychlost šíření UZ podélného vlnění v trojrozměrném prostředí [ $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$$v_{L3} = k_3 \cdot v_{L1}$$

kde  $v_{L1} \dots$  je rychlost šíření UZ podélného vlnění v jednorozměrném prostředí [ $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

Takto získaná pevnost je zvláště u neznámých betonů pouze orientační. Její odhad ale poslouží k dopočítání potřebné zatěžovací síly, jejíž 10 % podílem je potřeba zatížit zkušební vzorek při měření odrazovými metodami.

### 2.1.2 Rezananční metoda

Princip této metody je opět nedestruktivní a spočívá v rozkmitání daného vzorku vlivem mechanického impulsu, jež lze provést několika způsoby. K vyhodnocení dynamických materiálových vlastností se volí kmitočty podélného  $f_L$ , příčného  $f_f$  a kroutivého  $f_T$  kmitání (viz Obr. 2-3).

Rezonanci, neboli vlastní kmitočet, představuje vzrůst amplitudy vynucených kmitů na zkoušeném tělese na maximum.



**Obr. 2-3** Způsoby rozkmitání tělesa – podélné  $f_L$ , příčné  $f_f$  a kroutivé  $f_T$

Pomocí takto naměřených kmitočtů, známé objemové hmotnosti a rozměrů zkušebního tělesa, se stanoví charakteristiky pružnosti materiálu tj. dynamický modul pružnosti v tahu a tlaku  $E_{br}$ , ve smyku  $G_{br}$  a dynamický Poissonův součinitel  $\nu_{br}$  [1-2].

### 2.1.2.1 Stanovení dynamického modulu pružnosti betonu $E_{br}$ [1-2]

Hodnota dynamického modulu pružnosti v tlaku nebo tahu  $E_{br}$  se vypočte 2 způsoby

z podélného kmitání  $E_{brL} = 4 \cdot L^2 \cdot f_L^2 \cdot \rho$  [MPa]

z příčného kmitání  $E_{brf} = 0,0789 \cdot c_1 \cdot L^4 \cdot f_f^2 \cdot \rho \cdot \frac{1}{i^2}$  [MPa]

kde  $f_L, f_f \dots$  jsou naměřené vlastní frekvence podélného a příčného kmitání [kHz]

$L \dots \dots$  je podélný rozměr vzorku [m]

$c_1 \dots \dots$  je korekční součinitel zahrnující vliv smyku a setrvačnosti, jeho hodnotu je nutné interpolovat [-]

$i \dots \dots$  je poloměr setrvačnosti průřezu  $i = \frac{a}{\sqrt{12}}$  [m]

### 2.1.2.2 Stanovení dynamického modulu pružnosti betonu ve smyku $G_{br}$ [1-2]

Hodnota dynamického modulu pružnosti ve smyku  $G_{br}$  se vypočte dle vzorce

$$G_{br} = 4 \cdot k \cdot L^2 \cdot f_t^2 \cdot \rho \quad [\text{MPa}]$$

kde  $k \dots \dots$  je součinitel závislý na tvaru průřezu vzorku, pro čtverec  $k = 1,183$

### 2.1.2.3 Stanovení dynamického Poissonova součinitele $\nu_{br}$ [1-2]

Hodnota dynamického Poissonova součinitele  $\nu_{br}$  se vypočte dle vzorce

$$\nu_{br} = \frac{E_{brL}}{2 \cdot G_{br}} - 1 \quad [-]$$

kde  $E_{brL} \dots \dots$  je dynamický modul pružnosti v tahu – tlaku z podélného kmitání [MPa]

$G_{br} \dots \dots$  je dynamický modul pružnosti ve smyku [MPa]

Hodnota Poissonova součinitele se může pohybovat pouze v intervalu od 0 do 0,5. Vypočtená hodnota se zaokrouhluje na 0,02 [1-2].

## 2.2 Tvrdoměrná odrazová metoda

### 2.2.1 Tvrdost

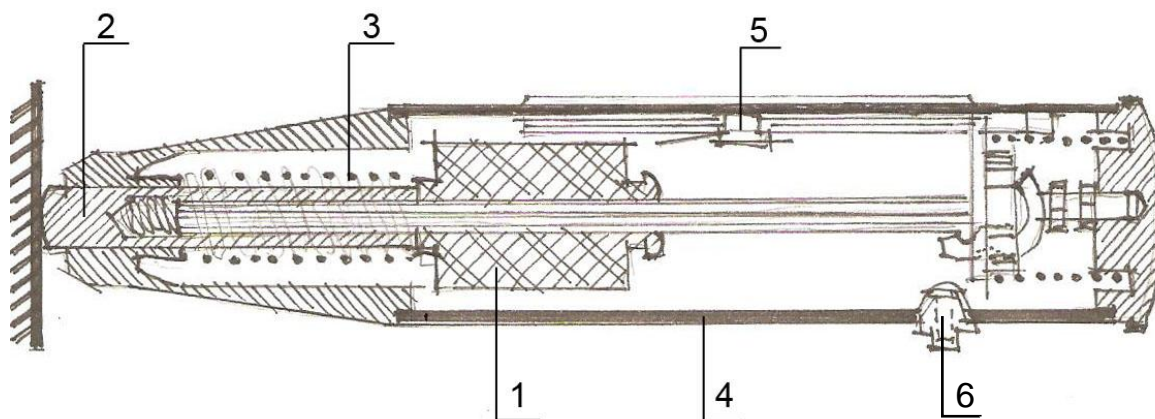
Tvrdostí se rozumí schopnost materiálu zabránit tvárné (trvalé plastické) deformaci způsobené vnikáním cizího tělesa do materiálu [1-5].

I přes hojné uplatnění zkoušek tvrdosti materiálu v praxi, nelze tvrdost definovat jako fyzikální veličinu. Neexistuje pro ni exaktní vztah a zjišťuje se mnoha metodami. Mezi nejznámější nedestructivní odrazové metody patří tvrdoměry Schmidt švýcarské firmy Proceq, které se mezi sebou liší v technologii a provedení.

### 2.2.2 Popis klasického Schmidtova tvrdoměru

Schmidtovy tvrdoměry fungují na principu pružného odrazu standardního tělesa vrženého určitou energií od povrchu testovaného materiálu. Obecně lze říci, že přístroj pracuje tak, že **úderník** (2), který je zakončen oblým koncem, se opře o zkušební stěnu konstrukce, co nejlépe v kolmém směru. Zatlačí se na přístroj a uvolněním **tažné pružiny** (3) z **pouzdra** (4) se **beran** (1) uvolní a dopadne na **úderník** (2). Dojde k odrazu, který posune vlečný ukazatel na **stupnici** (5) a zaznamená tak velikost odrazu (zn.  $a$ ). V tento moment je možné zmáčknout **aretační knoflík** (6), jenž vyskočil po odrazu razníku a zaaretovat tak hodnotu na stupnici. Tato hodnota se odečte a zapíše. Pro další měření je nutno přístroj odaretovat. To se provádí tak, že se přístroj opět opře o stěnu zkušebního vzorku (konstrukce), mírně se na něj zatlačí a dojde k uvolnění **razníku** (2). Také je možné přístroj vůbec nearetovat a odečíst hodnoty ze stupnice ihned po odrazu. To však může být v některých případech takřka nemožné [1-2].

Schéma funkce přístroje je znázorněna na Obr. 2-4.



**Obr. 2-4** Schéma mechanismu uvnitř klasického Schmidtova tvrdoměru



Nejčastějšími typy, které se vzájemně liší ve velikosti vynaložené energie na zkoušeném

vzorku, jsou: *Typ L (light)* = 0,75 J, rozsah pevností  $f_{c,cube}$  13 až 50 MPa

*Typ N (normal)* = 2,25 J, rozsah pevností  $f_{c,cube}$  17 až 60 MPa

*Typ M (massive)* = 30,0 J, rozsah pevností  $f_{c,cube}$  25 až 60 MPa



**Obr. 2-5** Vzhled klasického Schmidtova tvrdoměru typ L, N

Hodnoty tvrdosti zkoušeného vzorku se převedou na pevnost v tlaku pomocí kalibračního vztahu. Tento vztah je nastaven obecně, proto je potřeba si uvědomit, že takto získané hodnoty se od skutečných liší.

Podle druhu konstrukce, stáří betonu apod. se zvolí patřičný typ tvrdoměru. Rovněž jsou výrobcem předepsány i polohy, ve kterých lze s přístrojem měřit. Norma ČSN 73 1373 [2-2] udává obecné kalibrační vztahy pro měření s přístrojem svisle (shora, zdola), šikmo a vodorovně. Poloha při zjišťování tvrdosti zkušební krychle je vodorovná. Během takového měření v laboratoři je nutné mít vzorek přichycen v lisu pod určitým zatížením. Velikost tohoto zatížení představuje 10 % skutečné pevnosti v tlaku. Tuto hodnotu lze odhadnout z naměřených hodnot UZ zařízením [1-2].

V této práci se jednalo o zatížení 50 kN, které zůstalo po celou dobu zkoušení konstantní. Mezi novinky odrazových tvrdoměrů se řadí např. SilverSchmidt ST/PC typu N a SilverSchmidt ST/PC typu L s hříbovým nástavcem.

### 2.2.3 Popis elektronického Schmidtova tvrdoměru PC-N

Dle údajů v [4-1] a [1-9] je SilverSchmidt PC-N prvním přístrojem v kategorii odrazových tvrdoměrů, který neměří posun vlečného ukazatele na stupnici, nýbrž rychlost nárazu a odrazu beranu snímanou optickým zařízením.

Přístroj je celkově přestavěn, ale princip mechanismu zůstal v základě obdobný jako u klasických odrazových tvrdoměrů. V porovnání s nimi, ale představuje řadu výhod. Má rozšířené spektrum použití, bezkonkurenční opakovatelnost (až 19 000 úderů bez nutnosti kalibrace) a není závislý na úhlu nárazu.

Tato nová generace přístrojů zavádí elektronický displej a spolu s ním i optický snímač, který zaznamenává rychlost beranu těsně před úderem  $v_F$  a rychlost těsně po odrazu  $v_R$ . Z těchto rychlostí se vypočte kinetická energie, čili energie před dopadem a energie po odrazu, a z jejich vzájemného poměru se vyhodnotí bezrozměrná veličina  $Q$ . Tato hodnota bude vždy nižší než 100 %.

Vzhledem k tomu, že měření rychlosti proběhne v minimálním časovém úseku, lze vliv gravitačního zrychlení zanedbat. Tato skutečnost byla testována výrobcem tak, že se tvrdoměrem zjišťovala hodnota  $Q$  na kovadině umístěné na stropě, stěně a podlaze. Ve všech třech směrech byla hodnota  $Q$  stejná [1-9].

Přístroj a schéma mechanismu je zobrazeno na Obr. 2-6.



**Obr. 2-6** Elektronický tvrdoměr SilverSchmidt PC-N, energie rázu 2,207 J [1-9]

V přístroji je zabudován krytý USB konektor, který je součástí pouzdra. Umožňuje tak přenos naměřených údajů do počítače, jejich zálohování či následné zpracování softwarem dodávaném k přístroji. Pouzdro sestává ze dvou plastových částí a má trojhranný průřez, který brání jakémukoliv pohybu v době, kdy se přístroj nepoužívá. Podle údajů výrobce má v porovnání se Schmidtem N výrazně nižší rozptyl naměřených hodnot [1-9].

### 2.2.3.1 Odrasový koeficient $Q$

Jak již bylo popsáno v předchozí kapitole, tvrdoměr SilverSchmidt PC-N měří rychlost nárazu  $v_F$  a rychlost odrazu  $v_R$  v okamžiku těsně před dopadem a po odrazu beranu na úderník. V rámci newtonovské mechaniky se z rychlostí stanoví kinetická energie  $E_k$  před dopadem a po odrazu. Z jejich vzájemného poměru se stanoví bezrozměrná hodnota  $Q$ , představující úbytek energie.

$$Q = 100 \cdot \sqrt{\frac{E_{odrazu}}{E_{rázu}}} = 100 \cdot \sqrt{\frac{\frac{1}{2}mv_R^2}{\frac{1}{2}mv_F^2}} = 100 \cdot \frac{v_R}{v_F}$$

Kde  $m$  ..... je hmotnost beranu (tělíska)

$v_R$  ..... je rychlost krátce po nárazu

$v_F$  ..... je rychlost krátce před dopadem

Hodnotu  $Q$  není třeba dále upravovat vzhledem k úhlu nárazu, jak je zvykem u jeho předchůdců, protože se vliv gravitace neuvažuje. Toto je značný pokrok a výhoda, které se využije zvláště ve ztížených podmínkách měření.

Při měření běžnými tvrdoměry Schmidt dochází kromě tření na vodící tyči způsobené pohybem berana k úderníku i k tření pohybem ukazatele na číselníkové stupnici. Měření klasickými tvrdoměry je rovněž ovlivněno právě gravitací. Proto lze konstatovat, že koeficient odrazu  $Q$  získaný elektronickým měřením a z matematického výpočtu, je z hlediska přesnosti a rychlosti měření výhodnější. Je tedy ukazatelem správné volby pro přepočet na pevnost v tlaku  $f_c$ . Tento přepočet lze provést automaticky dle obecného kalibračního vztahu, který je nastaven v přístroji anebo dle vztahu, který je možné si do přístroje uložit.

Obecný kalibrační vztah vychází z referenční exponenciální křivky, stanovené Federálním institutem pro výzkum materiálů a testování v Berlíně, Německo.

[1-8, 1-9, 4-1]

### 2.2.4 Faktory ovlivňující tvrdoměrné měření

#### *Povrch betonového zkušebního vzorku či konstrukce*

- je nutné odstranit hrubou strukturu tak, aby byl povrch dokonale hladký
- v případě zkušebních vzorků je hladkost stěn zaručena, ale je potřeba si dát pozor, zda se v místě zkoušení nenachází kamínek či naopak dutina. Takto naměřené hodnoty se zpravidla vůči hodnotám ostatním extrémně liší.
- karbonatace povrchové vrstvy (viz Kapitola 2.2.5)

#### *Vodní součinitel*

- beton s nízkým vodním součinitelem udává zpravidla vyšší odrazové hodnoty než beton s vyšším vodním součinitelem

#### *Teplota a vlhkost prostředí*

- zkušební testy na vzorcích by se měly provádět v prostředí s přirozenou vlhkostí
- testy na konstrukcích již hotových by se naopak neměly provádět, pokud je beton v konstrukci zmrzlý

#### *Pohyb zkušebního vzorku během testu*

- zkušební vzorek musí být tloušťky alespoň 100 mm a zajištěn proti pohybu např. sevřením v lise (viz. Kapitola 2.2.2)

#### *Směr provádění testu*

- tento faktor se týká pouze klasických odrazových tvrdoměrů Schmidt
- u nové technologie SilverSchmidt již nemá vliv

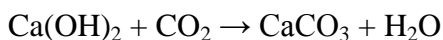
#### *Přítomnost výztuže*

- norma ASTM C805 (Severo-americký standart) uvádí, že zkoušení by se nemělo provádět na železo-betonu, kde je krytí výztuže menší než 20 mm

[1-8]

### 2.2.5 Karbonatace u alkalicky aktivovaných betonů

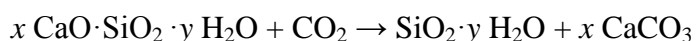
Obecně se dá proces karbonatace betonu popsat, jako atmosférická koroze, ke které dochází při reakci oxidu uhličitého uvolněného v atmosféře s volným hydroxidem vápenatým obsaženým uvnitř betonu. Výsledkem této chemické reakce je vzniklý uhličitán vápenatý a celkový pokles hodnoty pH.



Proces karbonatace u betonů s portlandským cementem je velmi pomalý. Nejprve začíná na povrchu a poté pomalu proniká hlouběji do konstrukce.

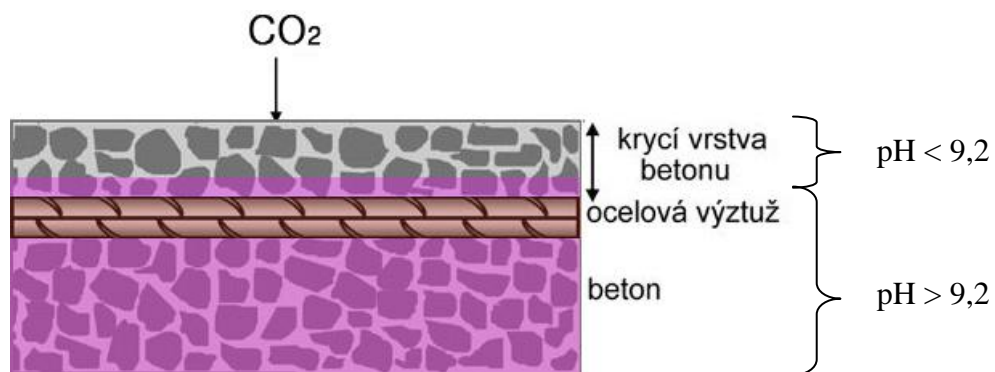
Naopak u alkalicky aktivovaných betonů na bázi strusky dochází k tomuto procesu rychleji a do větší hloubky. Oxid uhličitý působí na CSH gel (kalcium silikát hydrát), který alkalicky aktivované betony obsahují. Do jaké míry má toto působení vliv na mechanické vlastnosti materiálu, závisí na volbě alkalického aktivátoru.

Dle článku [3-3], kdy se jako aktivátor zvolí směs vodního skla, dochází během karbonatace k odvápnování CSH gelu a to způsobí ztrátu soudržnosti materiálu a pokles mechanické pevnosti. Pokud se jako aktivátor zvolí naopak hydroxid sodný NaOH, karbonatace zvyšuje soudržnost materiálu, pravděpodobně v důsledku srážení většího množství  $\text{CaCO}_3$  v pórech, a to způsobuje pokles celkové pórovitosti a tudíž i zvýšení mechanické pevnosti materiálu. Schéma chemické rovnice karbonatačního procesu je popsána níže.



Karbonatace tvoří tvrzenou vrstvu a to může vést během zkoušení k získávání vyšších hodnot odrazu, někdy až o 50%. Proto je nutno znát tloušťku zkarbonatované vrstvy při provádění těchto měření. Takto poškozenou vrstvu je nutné buďto před měřením odstranit nebo provést testování před a po odstranění zkarbonatované vrstvy.

V praxi se tato vrstva dá určit pomocí indikátorového roztoku fenolftaleinu v etanolu, kdy se indikátor nastříká na povrch betonové konstrukce. Díky karbonataci dochází ke snížení hodnoty pH v betonu. Jakmile klesne hodnota pH pod 9,2 nedochází ke zbarvení fenolftaleinu a tak se dá poznat zkarbonatovaná vrstva (viz Obr. 2-7).



**Obr. 2-7** Schéma zdravé a zkarbonatované vrstvy v betonu

Je-li hodnota  $\text{pH} < 9,2$  v oblasti výztuže, dojde k jejímu porušení vlivem koroze. Výsledkem koroze je rez, kvůli které začne výztuž nabývat na objemu a tento jev způsobí popraskání krycí vrstvy betonu, v některých případech i odpadnutí. Vnější prostředí má poté bezprostřední vliv na obnaženou výztuž a oslabuje statické spolupůsobení betonu s ocelí [1-5].

### 3 Přehled použitých destruktivních zkušebních metod (DT)

#### 3.1 Metoda stanovení pevnosti betonu v tlaku

##### 3.1.1 Pevnost

Pevnost se považuje za nejdůležitější mechanickou vlastnost materiálu, jejíž hodnota je dána smluvním mezním napětím.

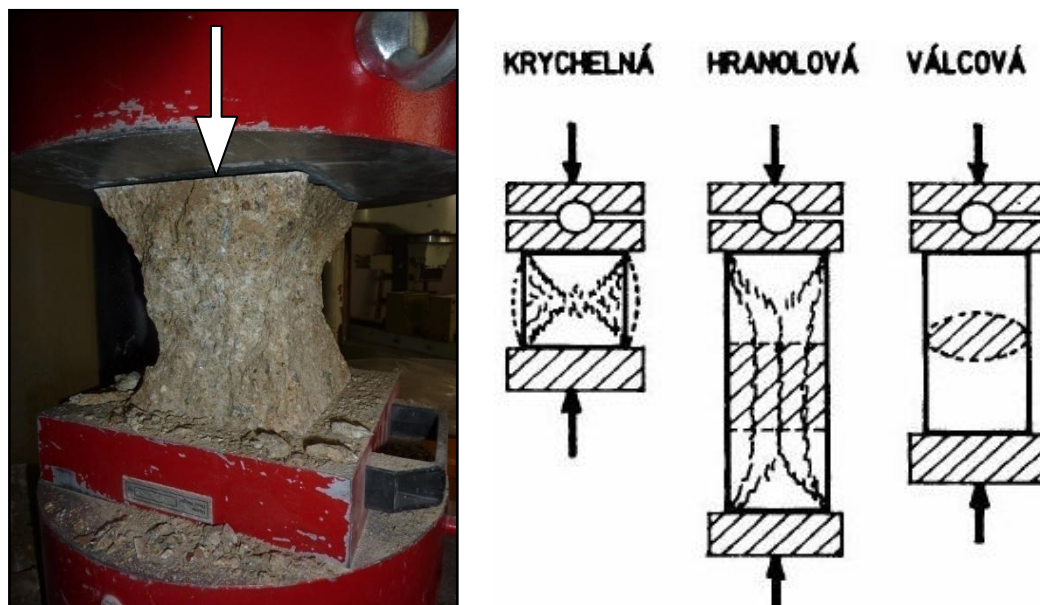
Míra pevnosti je ovlivněna mnoha faktory. Tvarem a velikostí zkušebního tělesa, opracováním tělesa, směrem namáhání, dobou trvání a rychlostí zatížení apod.

Aby bylo dosaženo uspokojivých výsledků, je nutno během měření dodržet podmínky experimentu dané technickou normou. Podle tvaru a způsobu namáhání tělesa, se rozlišují pevnosti na několik typů, viz následující kapitola.

##### 3.1.2 Stanovení pevnosti betonu v tlaku zatěžovacím lisem

Jako nejznámější metodika zjišťování pevnosti v tlaku je metoda rozdrčení vzorku v lise pod tlakovým zatížením na mezi únosnosti. Pevnost v tlaku se musí vyjádřit obecně jako  $f_c$  v MPa. Její další označení se už mění v závislosti na tvaru vzorku, zda je stanovena na krychlích  $f_{c,cube}$ , na válcích  $f_{c,cyl}$  nebo na hranolech  $f_{c,pr}$  (viz Obr. 3-1).

Poměr výšky k šířce základny u válců bývá 1:1 nebo 2:1, a u hranolů 3:1 nebo 4:1.



**Obr. 3-1** Ukázka zkoušky stanovení pevnosti v tlaku  $f_c$  [MPa]

Pevnost v tlaku je vyjádřena jako poměr tlakové zatěžovací síly  $F_c$  v [N] ku vzdorující ploše materiálu  $A_0$  v [mm<sup>2</sup>]. Tento poměr je dán následujícím vztahem:

$$f_c = \frac{F_c}{A_0} \quad [\text{MPa}]$$

Při tlakové zkoušce se nezjistí skutečná pevnost nýbrž tzv. smluvní pevnost v tlaku. Během testu je vzorek umístěn v lise, kde dochází k sevření na obou stranách a vzniká tak značné tření. Toto tření zabraňuje příčnému roztahování zkušebního tělesa.

Krychelná pevnost se oproti válcové či hranolové liší. To je způsobeno rozdílným poměrem výšky ku šířce základny. Proto je krychelná pevnost vždy vyšší než pevnost stanovená na válcích či hranolech.

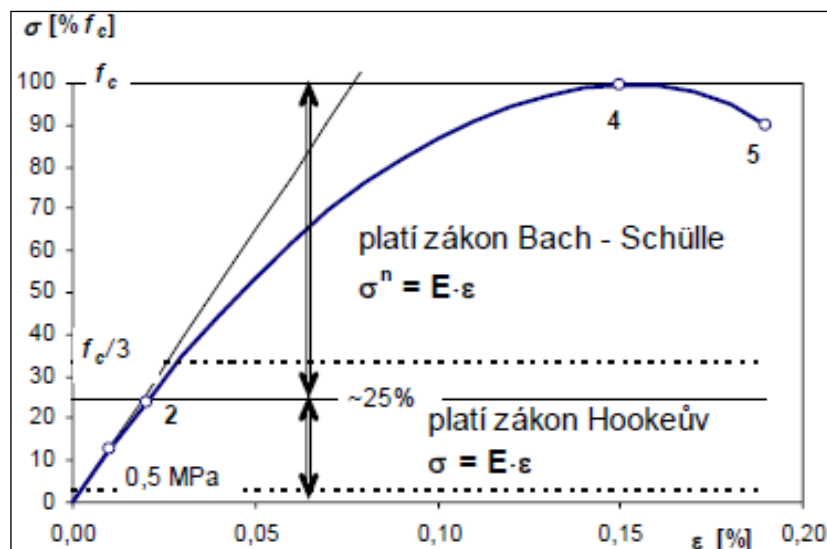
Vztahy pro určení poměru mezi krychelnou, hranolovou a válcovou pevností jsou uvedeny v normě ČSN ENV 206 [1-4].

## 3.2 Metoda stanovení statického modulu pružnosti betonu v tlaku

### 3.2.1 Modul pružnosti

Modul pružnosti je základní betonovou pružnostní charakteristikou vyjadřující deformační vlastnosti materiálu.

Zjišťuje se z deformací vznikajících na zkušebním vzorku odpovídající známé hladině zatížení. Definice vychází z Hookeova zákona  $\sigma = E \cdot \varepsilon$  v pružné oblasti, kde napětí  $\sigma$  je přímo-úměrné poměrné deformaci  $\varepsilon$ , a z Bach-Schülleho zákona  $\sigma^n = E \cdot \varepsilon$  v nepružné oblasti betonu (viz Obr 3-2). Exponent  $n$  je ve vzorci číslo větší jak 1 a do 20 až 30 % pevnosti betonu se uvažuje hodnotou  $n = 1$  [1-4].



**Obr. 3-2** Deformační diagram betonu v tlaku [1-2]



#### 3.2.2 Stanovení statického modulu pružnosti

Modul pružnosti  $E$  je dán poměrem napětí  $\sigma$  ku poměrnému přetvoření  $\varepsilon$ , viz vztah (1).

Jedná-li se o smykové namáhání, uvažuje se modul pružnosti ve smyku  $G$ , který je dán poměrem tečného napětí  $\tau$  a zkосу  $\gamma$ , viz vztah (2) [1-4, 1-3].

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad [\text{MPa}] \quad (1) \quad G = \frac{\tau}{\gamma} \quad [\text{MPa}] \quad (2)$$

Zjišťování statického modulu pružnosti  $E_c$  se provádí na hranolech pomocí speciálního tenzometricky měřícího zařízení. Toto zařízení zaznamenává vznikající deformace v průběhu cyklického zatěžování vzorku, který je umístěn v tlakovém lise (viz Obr. 3-3). Základní spodní hranice zatížení je volena přibližně na 0,5 MPa a horní hranice tak, aby odpovídala přibližně 1/3 pevnosti betonu v tlaku. Pevnost v tlaku se stanoví např. na krychlich v odpovídající den zkoušení [1-1].



**Obr. 3-3** Ukázka zkoušky stanovení statického modulu pružnosti cyklickým zatěžováním hranolu o rozměrech 100/100/400 mm a záznamové zařízení.

Touto metodou se rovněž stanoví součinitel příčné roztažnosti nebo jinak známý jako Poissonovo číslo, které představuje poměr mezi příčnou a podélnou deformací v osově namáhaném tělese. Hodnota Poissonova čísla je bezrozměrná a u betonu se pohybuje v rozmezí od 0,0 do 0,5 [1-4].

### 4 Vzájemná kombinace NDT a DT zkušebních metod

Kombinování zkušebních metod se vyplatí využívat v případě nedestruktivního zkoušení, kdy je zapotřebí zvýšit přesnost měření. A to především u konstrukcí či dílců, do kterých není možné zasahovat destruktivními zkouškami, např. jádrovými vývrtky. Vzájemné kombinování metod primárně slouží k určení časového vývoje pevnosti betonu v tlaku a modulu pružnosti nově betonovaných konstrukcí [1-10].

Jako zásadní se uvažují metody:

- 1) *Ultrazvuková impulzová metoda* – ukazatelem je rychlost šíření UZ impulsu  $v_L$
- 2) *Tvrdoměrná metoda odrazová* – ukazatelem je buďto odraz  $a$  tvrdoměrem Schmidt typu N, L nebo podíl energie  $Q$  tvrdoměrem SilverSchmidt PC-N

Vzhledem k tomu, že tvrdoměry Schmidt N a SilverSchmidt PC-N pracují na stejném principu, není doporučeno tyto dvě metody vzájemně kombinovat. Doporučuje se tedy kombinovat metodu tvrdoměrnou s metodou ultrazukovou [3-1].

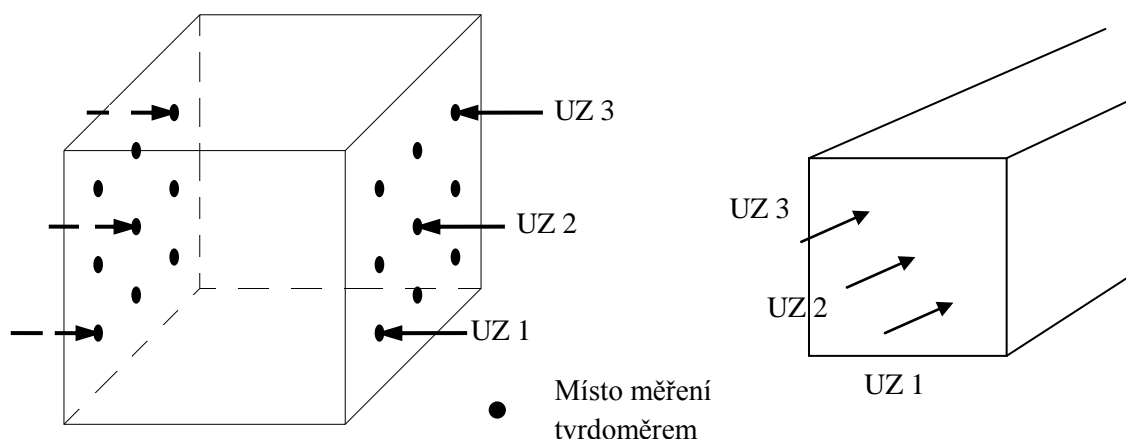
Vzájemná kombinace nedestruktivních metod je detailněji popsána v bakalářské práci autora [1-10].

#### 4.1 Měření na zkušebních tělesech

Tvoření vlastního kalibračního vztahu pro stanovení pevnosti betonu v tlaku  $f_c$  se provádí měřením na zkušebních tělesech tvaru krychle o hraně 150 mm.

V případě kalibračního vztahu pro stanovení statického nebo dynamického modulu pružnosti betonu  $E$  je zkušebním tělesem hranol o rozměrech 100/100/400 mm.

Krychle i hranoly se nejprve zkouší metodou ultrazvukového vlnění ze dvou protilehlých stěn ve směru rovnoběžném s hutněním čerstvého betonu. Měření se provádí nejméně na 3 místech. Poté nastupuje metoda tvrdoměrná (Schmidt L, Schmidt N a SilverSchmidt PC N). Měření se provádí na stejných stěnách zkušebního vzorku, na kterých již bylo provedeno měření ultrazvukem. Místo měření odrazu tvrdoměry je nutno volit ve vzdálenosti minimálně 30 mm od hrany zkušebního vzorku a tak, aby se jednotlivá místa nekryla. Počet zkušebních míst se většinou volí v počtu 10 a to v poměru 5 na dvou z protilehlých stran zkušebního tělesa (viz Obr. 4-1) [3-1, 2-3].



**Obr. 4-1** Měření metodou tvrdoměru a ultrazvuku na zkušební krychli a hranolu [3-1]

## 4.2 Kalibrační vztahy

Kalibrační vztahy vychází z naměřených bodů a stanovují se metodami matematické statistiky např. regresní analýzou. Rozsah kalibračního vztahu dle ČSN 73 1370 musí být takový, aby umožňoval stanovení hodnot sledované vlastnosti všech velikostí, které při zkoušení mohou přicházet v úvahu.

Kalibrační vztahy se dle normy ČSN 73 1370 rozlišují na:

### a) Obecný

- Vztah odvozený z prakticky dosažitelného velkého počtu ukazatelů nedestruktivního měření a ukazatelů sledované vlastnosti betonu, dosažených na min 300 zkušebních vzorcích z betonů různého složení

### b) Směrný

- Vztah odvozený z většího počtu nedestruktivního měření a ukazatelů sledované vlastnosti betonu, dosažených na min 100 zkušebních vzorcích zhotovených z betonů, které jsou obvyklé pro sledovanou vlastnost

### c) Určující

- Vztah mezi ukazateli nedestruktivního měření a ukazateli sledované vlastnosti betonu, dosažených na zkušebních vzorcích z betonů ze stejných složek, stejnou technologií, ale pro různé hodnoty sledované vlastnosti betonu. Předpokladem určujícího kalibračního vztahu je přibližně pravidelné rozložení hodnot vlastností v pokud možno stejných intervalech se stejnou četností v prověřovaném oboru měřené vlastnosti.
- Úzký určující kalibrační vztah je stanovený v rozsahu jedné třídy betonu na 18 až 24 zkušebních vzorcích

- Široký určující kalibrační vztah je stanovený v rozsahu dvou nebo více tříd betonu na 36 zkušebních vzorcích [2-3]

Tvorbě kalibračních vztahů pro konkrétní případy se věnuje Kapitola 6.3 a 6.4, ve které jsou použity termíny jako obecný a směrný určující kalibrační vztah. Autor si přitom uvědomuje, že označení kalibračního vztahu jako „obecný“ nesplňuje zcela dokonale kritéria dané normou z hlediska počtu zkušebních těles. Termín obecný kalibrační vztah byl použit především z důvodu odlišení, že se jedná o vyšší počet zkušebních těles a různé záměsi než jako u kalibračního vztahu určujícího.

#### 4.2.1 Upřesnění kalibračního vztahu dle ČSN 73 1370

Obecný nebo směrný kalibrační vztah lze upřesnit, vynásobením součinitelem  $\alpha$ . Takto se upřesní hodnota požadované vlastnosti.

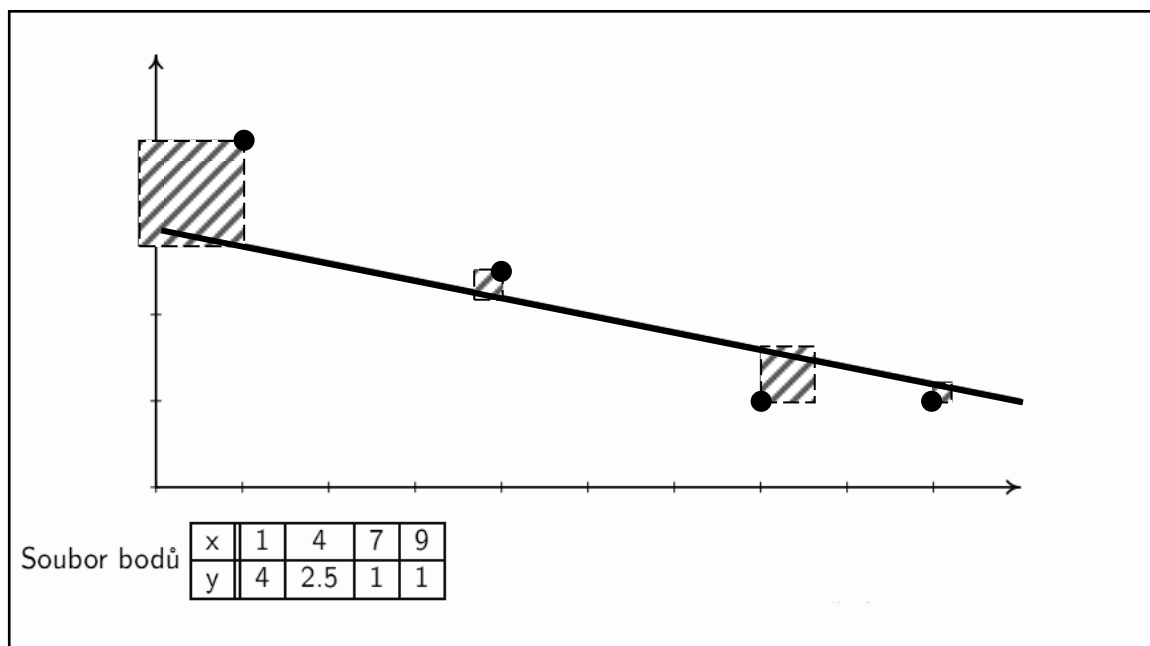
$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n V_{ni}}{\sum_{i=1}^n V_{ei}}$$

kde  $\alpha$  ..... poměr součtu ukazatelů vlastností  $V_n$  dělený součtem ukazatelů vlastností stanovených nedestruktivním měřením  $V_e$ , v obou případech při stejném počtu měření  
 $n$  ..... je počet měření  
 $V_{ni}, V_{ei}$  ... ukazatele vlastností stanovené z  $i$ -tého měření

#### 4.2.2 Lineární regrese

Této metody se využívá zpravidla, pokud se pracuje s naměřenými daty získanými experimentálním měřením. Jedná se o regresní analýzu, která využívá metody nejmenších čtverců neboli vzdáleností měřených bodů, určených v pravoúhlém souřadnicovém systému [4-2].

Lineární regrese představuje aproximaci daných hodnot polynomem 1. řádu (přímku), aby součet druhých mocnin odchylek jednotlivých bodů od přímky byl minimální. Snahou je vystihnout polohu přímky, aby procházela co nejbližší okolo vynesných bodů (viz Obr. 4-2). Optimální poloha přímky je ta, která minimalizuje součet všech ploch vyšrafovaných čtverců [4-3].



Obr. 4-2 Grafické znázornění metody nejmenších čtverců [1-10]

## 4.2.2.1 Regresní analýza [1-6]

Vychází z regresní funkce  $y = \varphi(x, \beta) = E(Y | X = x)$ . Cílem této funkce je hledat a zkoumat navzájem závislé proměnné. Tyto proměnné představují hodnoty získané experimentálním měřením.

Jejich náhodný charakter je pro závislé proměnné reprezentován náhodným vektorem  $X = (X_1, \dots, X_k)$  a pro nezávisle proměnné náhodnou veličinou  $Y$ . Je možné, že vektor  $X$  je nenáhodný, což v experimentu není vyloučeno, anebo mohou být rozptýly všech složek  $X_1, \dots, X_k$  vůči náhodné veličině  $Y$  zanedbatelné.

Výsledkem regresní analýzy je rovnice, která má v obecném zápisu následující tvar:

$$Y = a \cdot X_1 + c$$

$$Y = a \cdot X_1 + b \cdot X_2 + c$$

kde  $Y$ .....je závisle proměnná (hodnota náhodné veličiny  $Y$ ), neboli vstupní parametr z experimentálního destruktivního měření ( $f_{c,cube}$ ,  $E_c$ )

$X$ .....je vektor nezávisle proměnných (hodnota náhodného vektoru  $X$ ), neboli vstupní parametr z experimentálního nedestruktivního měření ( $Q$ ,  $a$  nebo  $v_L$ )

$a, b, c$  jsou regresní součinitelé jako odhady neznámých parametrů teoretických regresních funkcí

## 5 Materiály a experimentální postupy

### 5.1 Identifikace betonu

Experiment je založen na provedení laboratorních zkoušek měřením pevnosti v tlaku a statického modulu pružnosti alkalicky aktivovaného betonu (dále jen AAB). Pevnost v tlaku se určovala na zkušebních krychlích o hraně 150 mm a statický modul pružnosti se určoval na hranolech o rozměrech 100/100/400 mm. Celkově byly použity vzorky AAB vyrobené ze třech záměsí, které se mezi sebou lišily ve vodním součiniteli a použitým plastifikátorem.

Beton byl míchán v provozu v ŽPSV a.s., v závodě Uherský Ostroh v míchačce o objemu 750 l, mícháno bylo 200 l betonu ve třech termínech (viz Obr. 5-1).



**Obr. 5-1** Míhací zařízení o objemu 750 l

V každém termínu bylo zhotoveno 18 ks krychlí pro zkoušení odrazovými metodami, pro měření rychlosti šíření ultrazvuku a následnou zkoušku pevnosti v tlaku. Dále byly zhotoveny 3 ks hranolů pro měření rychlosti šíření ultrazvuku, měření rezonanční metodou, určení statického modulu pružnosti a 2 ks hranolů pro měření metodou akustické emise, o které ovšem tato práce nepojednává.



Pro první nedestruktivní zkoušky bylo použito dříve vyvinutého AAB s vodním součinitelem  $voda / struska = 0,50$  (započítána je samozřejmě i voda z roztoku sodného vodního skla a hydroxidu draselného), s poměrem  $obsah\ sušiny\ v\ aktivátoru / dávka\ strusky = 10\%$  a s hmotnostním poměrem  $(Na_2O + K_2O) / SiO_2 = 60/40$ . Struska byla použita ve formě jemně mleté granulované vysokopecní strusky (Kotouč Štramberk) s měrným povrchem min.  $420\ m^2/kg$ . V následujících dvou záměsích se snížil vodní součinitel o 5 a 10 % ( $w = 0,45$  a  $w = 0,40$ ), přičemž se použil vhodný plastifikátor. Redukcí vodního součinitele se zjišťuje, do jaké míry má vodní součinitel vliv na jednotlivá měření a výsledné vlastnosti AAB [3-2].

### 5.2 Metodika zkoušení

#### 5.2.1 Příprava forem pro zkušební tělesa

Ocelové formy pro zkušební tělesa byly před betonáží zevnitř vymazány olejovým mazivem, aby bylo zajištěno snadnější odformování. Hutnění čerstvého betonu bylo provedeno poklepem a zednickou lžící.

Po zabetonování byla tělesa přikryta folií (viz Obr. 5-2).



**Obr. 5-2** Ukázka forem pro zkušební krychle (vlevo) a uložení těchto forem po vyplnění betonem v laboratoři (vpravo)

Všechna zkušební tělesa byla odformována ve stáří 20 – 24 hodin a ihned byla obalena folií, aby bylo zabráněno výměně vody s okolím. Takto ošetřená tělesa byla ponechána v laboratorním prostředí až do doby provádění zkoušek (viz Obr. 5-3).



**Obr. 5-3** Zhotovená zkušební tělesa zabalená v potravinářské fólii

### 5.2.2 Postupy zkoušení v laboratoři

Měření bylo prováděno v laboratorním prostředí ŽPSV a.s. závodu Uherský Ostroh pod dohledem Ing. Vlastimila Bílka, PhD.

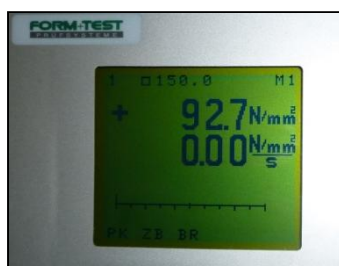
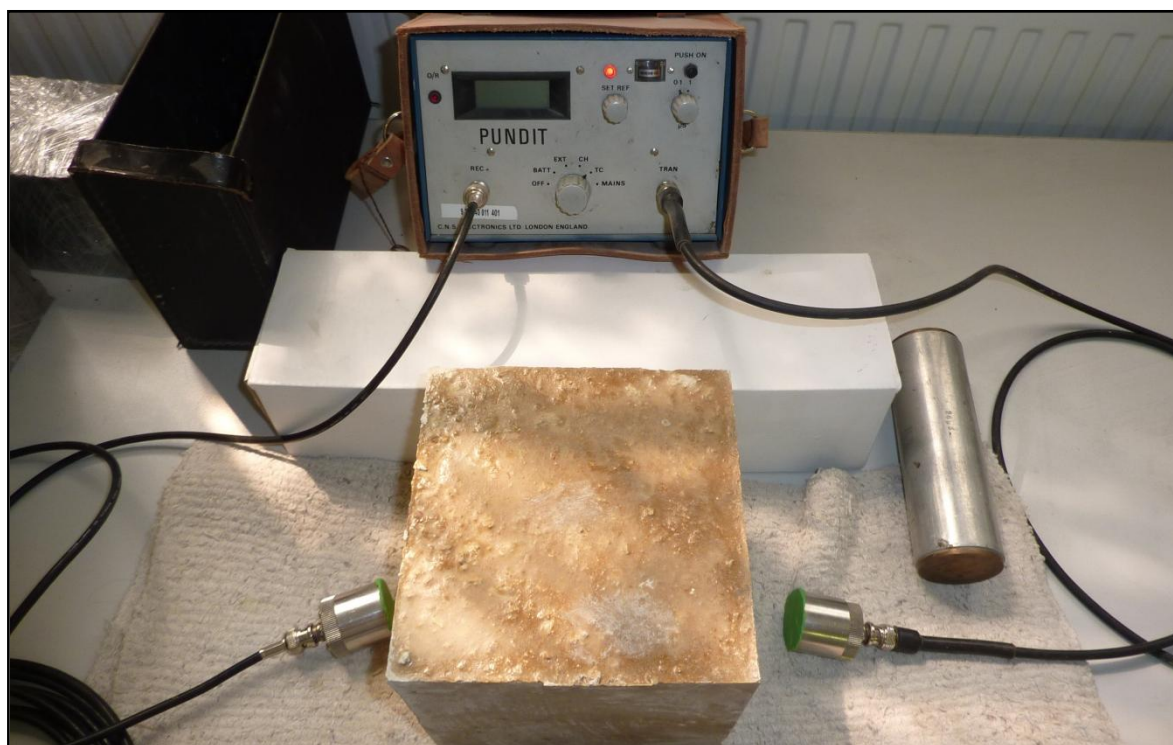
Pevnosti v tlaku byly měřeny ve stáří 24 hodin, 2, 3, 7, 28 a 90 dní. V každém stáří se zkoušely 3 krychle, u kterých byly nejprve zjištěny rozměry a hmotnost. Na každé krychli se poté provedlo měření rychlosti šíření UZ impulsu přístrojem PUNDIT. Následně byla krychle upnuta do lisu a zatížena na 10 – 15% očekávaného zatížení při porušení (zatížení bylo nastaveno na 50 kN po celou dobu zkoušení). Na dvou protilehlých stranách se získalo celkem 10 údajů pro tvrdoměry Schmidt L, Schmidt N a SilverSchmidt PC-N. Jako poslední byla provedena zkouška pevnosti v tlaku, kde se rozdrčením zkušebního vzorku získala hodnota krychelné pevnosti  $f_{c,cube}$  v MPa.

Přehled jednotlivých výše zmíněných zkušebních metod je znázorněn na Obr. 5-4.

Dynamický modul pružnosti  $E_{bu}$  byl vypočten z měření ultrazvukovou metodou na třech hranolech ve stáří 1, 2, 3, 7 a 28 dní. Zkouška rezonanční a zkouška pro určení statického modulu pružnosti se prováděla pouze ve stáří 28 dnů. Na základě rezonanční zkoušky se určil kromě dynamického modulu pružnosti  $E_{br}$  i Poissonův koeficient  $\nu_{br}$ , na kterém je závislý výpočet dynamického modulu pružnosti  $E_{bu}$  stanoveného ultrazvukovou metodou. Poté se hranoly umístily do tlakového lisu, kde proběhlo cyklické zatěžování v intervalu 5 až 210 kN a tenzometrickým zařízením se naměřily deformace, na základě kterých se vypočetl statický modul pružnosti  $E_c$  v GPa.

Na závěre byly hranoly rozdrčeny v tlakovém lise a získala se tak 28 denní hranolová pevnost  $f_{c,pr}$  v MPa (viz Obr. 5-5).





Obr. 5-4 Ukázka jednotlivých použitých NDT a DT metod při měření



**Obr. 5-5** Statická zatěžovací zkouška (vlevo) a tlaková zkouška hranolu (vpravo)  
ve stáří 28 dní

### 5.2.3 Postup zkoušení na hotovém dílci

Vzhledem k tomu, že se Ing. Vlastimil Bílek, PhD. zabývá alkalicky aktivovanými betony několik let, nabídla se možnost ověřit výsledky kalibrace na hotovém dílci betonovaném cca před třemi lety. Jedná se o prvky dělicích stěn tvaru obráceného „Y“, jejichž receptura byla obdobná jako v případě záměsí 1 až 3 této práce. Tyto prvky jsou dále v textu označovány jako „svodidla“.

Svodidla se nachází ve městě Újezd u Brna. Některé z nich slouží jako opěra svahu mezi místní komunikací a rybníkem a zbývající jsou pro pozdější účely uloženy na stavebním dvoře. Na všechny svodidla působí klimatické vlivy, takže je možné ověřit do jaké míry je ovlivněn jejich vývoj pevnosti v tlaku.



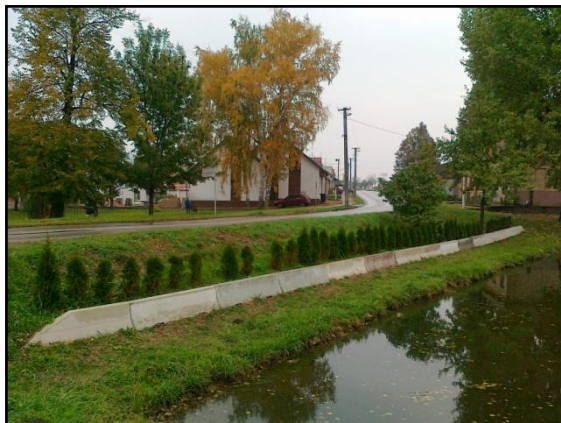
**Obr. 5-6** Místní rybník v městě Újezd u Brna [4-5]



### 5.2.3.1 Nedestruktivní měření prováděné na hrázových svodidlech

Měření se provádělo tvrdoměry Schmidt typu N a SilverSchmidt PC-N na čelní stěně svodidla v počtu 5 x 5 úderů. Pořadí měření svodidel bylo určeno směrem od obce Otnice (zprava-doleva) a jednalo se o množství 15 testovaných dílců.

Získalo se celkem 75 hodnot odrazu  $a_N$  a 75 hodnot úbytku energie  $Q$ .



**Obr. 5-7** Provádění NDT měření na hrázových svodidlech ▲▼



Na snímcích je možné vidět, že ne všechna svodidla odpovídala stejné kvalitě. Povrch některých dílců byl značně popraskán nebo vykazoval hrubé narušení způsobené odformováním. Naopak jiná tělesa měla povrch dokonale hladký a tvrdý. Svodidla byla vyrobena z různých receptur AAB - různá dávka alkalického roztoku, náhrada strusky popílkem nebo mletým vápencem, dokonce naprosté vyloučení vodního skla a hydroxidu. Proto se získané hodnoty odrazu  $a_N$  a hodnoty úbytku energie  $Q$  liší mezi jednotlivými svodidly.

Výsledky z NDT měření a hodnoty očekávané krychelné pevnosti  $f_{ce,cube}$  stanovené z obecného kalibračního vztahu, jsou uvedeny v Kapitole 7.

### 5.2.3.2 Nedestruktivní měření prováděné na dosud neaplikovaných svodidlech

Jak již bylo v úvodu této kapitoly řečeno, jedná se o svodidla umístěná na stavebním dvoře v Újezdu u Brna. Jinými slovy na volném prostranství, proto jsou rovněž vystavena klimatickým vlivům.

Na těchto svodidlech se opět provedlo nedestruktivní měření tvrdoměry Schmidt N a SilverSchmidt PC-N v počtu 5 x 5 úderů na jedno svodidlo. Tíha jednoho svodidla se pohybovala od 350 do 550 kg. Dílce byly přístupné ze všech stran a opatřeny výrobním označením představující číslo dílce a datum betonáže. Testovalo se celkem 9 svodidel na stěně kolmé k podélné ose prvku, čímž se získalo 45 hodnot odrazu  $a_N$  a 45 hodnot úbytku energie  $Q$ .



**Obr. 5-8** Provádění NDT měření na uložených svodidlech v areálu stavebnin ▲▼



Kvalita povrchu jednotlivých svodidel byla opět odlišná, díky různému složení, v obdobné míře jako u svodidel hrázových. Hodnoty odrazu  $a_N$  a hodnoty úbytku energie  $Q$  se tudíž opět mezi jednotlivými svodidly liší.

Naměřené hodnoty z NDT měření a vyhodnocení očekávané pevnosti v tlaku  $f_{ce,cube}$  obecným kalibračním vztahem jsou rovněž uvedeny v Kapitole 7.



## 6 Výsledky laboratorních zkoušek

### 6.1 Pevnost v tlaku

Jak již bylo popsáno v předchozí Kapitole 5.2.2, testování pevnosti v tlaku proběhlo na 18 krychlích o hraně 150 mm v 6 časových etapách. Zkušební krychle byly umístěny do lisu a následně rozdrčeny. Z předem získaných rozměrových charakteristik vzorku a z tlakové síly odečtené na lise se stanovila krychelná pevnost  $f_{c,cube}$  v MPa.

Tento postup se zopakoval v počtu 3 x 6 pro každou záměs zvlášť a porovnávalo se do jaké míry má na pevnost v tlaku vliv vodní součinitel, který se postupně redukoval, a které přístroje měřící odraz se prokážou jako nejvhodnější. Hodnota pevnosti v tlaku rovněž posloužila jako vstupní parametr závisle proměnné pro dosažení určujícího kalibračního vztahu. Tento proces je podrobněji popsán v Kapitole 6.3. Vycházelo se z předpokladu, že čím více se bude vodní součinitel snižovat, tím zároveň poroste i pevnost materiálu. Vodní součinitel, neboli poměr vody ku strusce, se pohyboval v intervalu od 0,5 do 0,4. Rozměrové charakteristiky a pevnosti zkušebních krychlí v jednotlivých záměsích jsou znázorněny v následujících tabulkách 6-1 až 6-3.

**Tab. 6-1** Záměs 1 ( $w = 0,5$ ); rozměrové a fyzikální charakteristiky a pevnosti v tlaku  $f_{c,cube}$

		Rozměry [mm]			Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Pevnost v tlaku [MPa]	Průměrná pevnost v tlaku [MPa]
Stáří	Vzorek	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>m</i>	$\rho$	$f_{c,cube}$	$f_{c,cube}$
1 DEN	K1	150,5	150,8	147,7	7,632	2277	13,5	14,0
	K2	150,7	150,4	151,7	7,724	2247	16,1	
	K3	150,7	150,2	149,9	7,661	2258	12,6	
2 DNY	K4	151,0	150,4	149,8	7,618	2241	22,3	20,8
	K5	150,7	150,1	153,1	7,619	2200	22,2	
	K6	151,0	150,5	150,1	7,816	2290	17,7	
3 DNY	K7	150,8	150,1	153,1	7,748	2236	29,1	27,2
	K8	150,3	150,2	148,1	7,504	2245	28,4	
	K9	150,5	150,7	151,5	7,732	2251	24,2	
7 DNÍ	K10	150,2	150,5	150,2	7,762	2285	27,3	30,1
	K11	150,3	150,6	151,4	7,892	2304	30,7	
	K12	150,4	149,7	152,8	7,712	2242	32,3	
28 DNÍ	K13	149,9	149,8	149,3	7,631	2276	49,8	47,6
	K14	149,8	150,9	151,3	7,780	2274	45,4	
	K15	150,6	149,8	150,1	7,736	2284	47,6	
90 DNÍ	K16	150,1	150,2	151,1	7,695	2259	50,9	51,8
	K17	150,4	149,6	151,9	7,828	2290	58,8	
	K18	149,2	149,3	145,6	7,713	2380	74,0	

Tab. 6-2 Záměs 2 ( $w = 0,45$ ); rozměrové a fyzikální charakteristiky a pevnosti v tlaku  $f_{c,cube}$ 

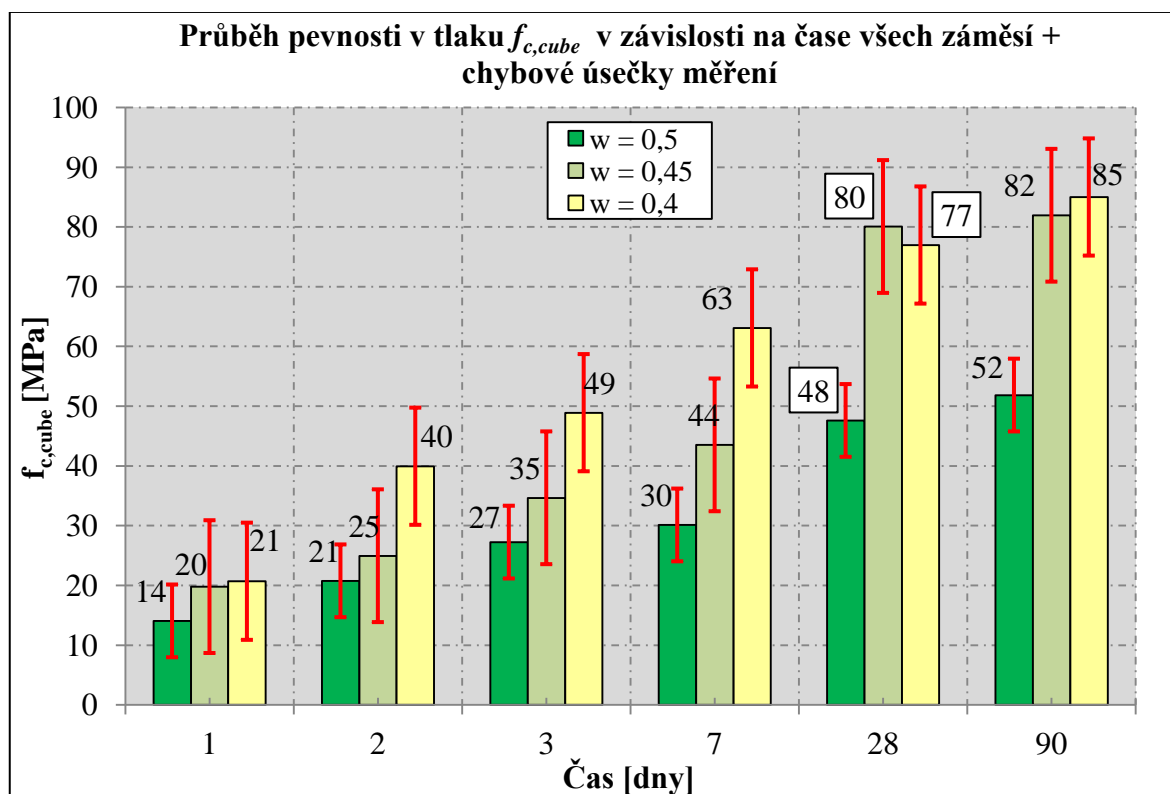
		Rozměry [mm]			Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Pevnost v tlaku [MPa]	Průměrná pevnost v tlaku [MPa]
Stáří	Vzorek	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>m</i>	$\rho$	$f_{c,cube}$	$f_{c,cube}$
1 DEN	K1	149,7	150,7	150,4	7,677	2263	20,2	19,8
	K2	149,7	150,3	149,2	7,636	2276	21,8	
	K3	150,0	151,1	151,9	7,745	2250	17,4	
2 DNY	K4	150,1	150,5	153,2	7,845	2268	23,8	25,0
	K5	150,9	150,2	153,1	7,865	2268	24,2	
	K6	150,1	150,0	150,0	7,721	2287	26,9	
3 DNY	K7	149,9	150,0	150,6	7,656	2260	34,1	34,6
	K8	150,4	150,6	151,5	7,839	2285	35,3	
	K9	150,1	150,0	149,3	7,660	2278	34,6	
7 DNÍ	K10	150,1	150,5	146,5	7,581	2291	40,3	43,5
	K11	150,3	150,0	151,7	7,761	2269	37,6	
	K12	150,1	149,7	150,6	7,705	2276	52,7	
28 DNÍ	K13	150,1	150,2	149,4	7,797	2316	80,7	80,0
	K14	150,2	150,1	150,0	7,805	2308	79,3	
	K15	149,9	150,2	149,4	7,761	2307	80,2	
90 DNÍ	K16	150,3	150,1	150,4	7,760	2288	63,5	81,9
	K17	150,0	150,0	150,2	7,913	2342	90,2	
	K18	150,8	150,0	150,3	7,966	2344	92,0	

Tab. 6-3 Záměs 3 ( $w = 0,4$ ); rozměrové a fyzikální charakteristiky a pevnosti v tlaku  $f_{c,cube}$ 

		Rozměry [mm]			Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Pevnost v tlaku [MPa]	Průměrná pevnost v tlaku [MPa]
Stáří	Vzorek	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>m</i>	$\rho$	$f_{c,cube}$	$f_{c,cube}$
1 DEN	K1	150,2	150,0	145,6	7,704	2349	21,6	20,7
	K2	150,5	150,1	151,1	7,941	2327	19,9	
	K3	149,9	150,6	154,1	8,089	2326	20,5	
2 DNY	K4	150,5	150,2	148,7	7,759	2307	39,8	39,9
	K5	150,2	150,1	153,1	7,829	2268	39,3	
	K6	150,1	150,2	151,6	8,099	2371	40,6	
3 DNY	K7	150,3	150,3	149,5	7,849	2324	46,0	48,9
	K8	150,3	150,5	152,5	8,061	2338	49,8	
	K9	150,0	150,3	148,8	7,843	2339	50,9	
7 DNÍ	K10	150,0	150,5	144,9	7,686	2349	61,6	63,1
	K11	150,2	149,6	155,6	8,006	2289	61,3	
	K12	150,5	150,9	148,8	7,817	2315	66,3	
28 DNÍ	K13	149,9	150,7	153,4	8,048	2322	78,0	77,0
	K14	150,0	149,9	153,4	8,005	2322	75,0	
	K15	150,3	150,3	152,1	8,093	2354	77,9	
90 DNÍ	K16	149,8	150,3	153,7	8,122	2348	89,0	85,0
	K17	150,0	149,5	147,3	7,721	2339	90,2	
	K18	150,4	149,4	144,9	7,591	2332	75,8	

Již z tabulek je patrné, že v závislosti na snížení vodního součinitele skutečně krychelná pevnost betonu rostla a při nejnižším vodním součiniteli  $w = 0,40$  dosáhla nejvyšších hodnot.

Pro lepší přehlednost a vzájemné porovnání jsou jednotlivé záměsi zobrazené v následujícím Grafu 6-1.



**Graf 6-1** Vývoj krychelných pevností betonu v tlaku ve třech záměsích

Pevnost v tlaku u první záměsi s vodním součinitelem  $w = 0,5$  narůstala rovnoměrně a nevýrazně po celou dobu zkoušení, zatímco záměs druhá s vodním součinitelem  $w = 0,45$  ve stáří 7 až 28 dnů prudce vzrostla.

Více lineární a průběžný nárůst výsledných průměrných hodnot pevnosti v tlaku měla záměs třetí s vodním součinitelem  $w = 0,4$ . Nicméně ve stáří 28 dnů vykazovala nižší pevnost než záměs druhá.

## 6.2 Modul pružnosti

Během experimentu se zjišťoval modul pružnosti dynamický a statický na třech zkušebních hranolech. K vyhodnocení dynamických modulů  $E_b$  posloužily nedestruktivní zkušební metody – ultrazvuková a rezonanční. Pro určení statického modulu  $E_c$  posloužila tlaková zkouška hranolu opatřeného tenzometrickým zařízením, které zaznamenává vznikající deformace během cyklického zatížení zkušební vzorku.

Ultrazvukovým zařízením se měřilo ve všech stáří zkušebních trámů, zatímco metoda rezonanční a tenzometrická se zvolila pouze ve stáří 28 dnů (podrobněji viz Kap. 5.2.2). Jednotlivé rozměrové charakteristiky zkušebních hranolů a jim odpovídající moduly pružnosti jsou uvedeny v následujících Tabulkách pro každou záměs zvlášť.

**Tab. 6-4** Rozměrové charakteristiky trámů a hodnoty z měření rezonance ve 28 dnech

		Rozměry [mm]			Hmotnost [kg]	Objem [m <sup>3</sup> ]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Rezonance [Hz]		
Stáří	Vzorek	$b$	$h$	$L$	$m$	$V$	$\rho$	$f_L$	$f_F$	$f_T$
28 DNÍ (w=0,5)	T1	100,9	100,9	399,5	9,290	4,068E-03	2284	4722	1944	2736
	T2	100,2	102,6	400,0	9,430	4,113E-03	2293	4713	1976	2717
	T3	101,7	102,9	400,0	9,440	4,186E-03	2255	4736	2012	2756
28 DNÍ (w=0,45)	T1	100,4	98,9	400,0	9,201	3,971E-03	2317	4643	1987	2758
	T2	100,4	98,7	399,5	9,129	3,961E-03	2305	4701	2010	2783
	T3	100,5	100,0	400,0	9,235	4,018E-03	2298	4713	2024	2788
28 DNÍ (w=0,4)	T1	100,5	101,8	400,0	9,519	4,092E-03	2326	4858	2068	2894
	T2	99,9	102,6	400,0	9,613	4,101E-03	2344	4879	2100	2894
	T3	100,4	102,5	400,0	9,617	4,120E-03	2334	4906	2116	2904

**Tab. 6-5** Hodnoty dynamických a statických modulů pružnosti pro Záměs 1 (w = 0,5)

		Podélná rychlost [m/s]	Dynamické moduly z rychlosti UZ impulzu [MPa]				Statický modul [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]	Variační koeficient [%]	Stejnomořnost betonu
Stáří	Vzorek	$v_L$	$E_{bu}$	$E_{br,L}$	$E_{br,f}$	$E_c$	$S_x$	$V_x$		
1 DEN	T1	3946	29100	-	-	-	231	0,80	velmi dobrá	
	T2	3972	28700	-	-	-				
	T3	3922	29100	-	-	-				
2 DNY	T1	4070	30900	-	-	-	306	1,00	velmi dobrá	
	T2	4076	30300	-	-	-				
	T3	4027	30700	-	-	-				
3 DNY	T1	4099	31400	-	-	-	404	1,29	velmi dobrá	
	T2	4122	30900	-	-	-				
	T3	4096	31700	-	-	-				
7 DNÍ	T1	4179	32600	-	-	-	231	0,71	velmi dobrá	
	T2	4203	32200	-	-	-				
	T3	4151	32600	-	-	-				
28 DNÍ	T1	4255	33800	32500	28600	25700	458	1,36	velmi dobrá	
	T2	4272	33200	32600	28800	25400				
	T3	4246	34100	32400	29300	24300				



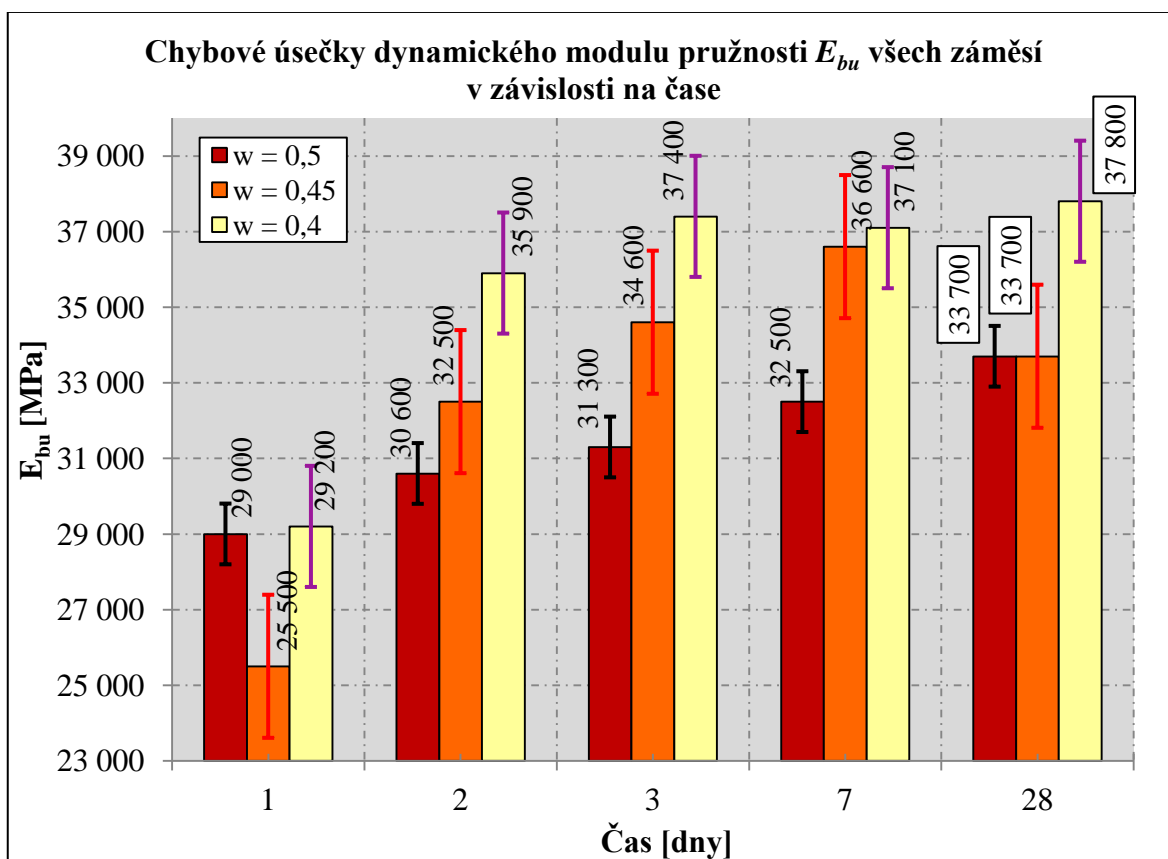
Tab. 6-6 Hodnoty dynamických a statických modulů pružnosti pro Záměs 2 ( $w = 0,45$ )

		Podélná rychlost [m/s]	Dynamické moduly z rychlosti UZ impulsu [MPa]			Statický modul [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]	Variační koeficient [%]	Stejnomořnost betonu
Stáří	Vzorek	$v_L$	$E_{bu}$	$E_{br,L}$	$E_{br,f}$	$E_c$	$S_x$	$V_x$	
1 DEN	T1	3492	25300	-	-	-	208	0,7	velmi dobrá
	T2	3509	25400	-	-	-			
	T3	3549	25700	-	-	-			
2 DNY	T1	3958	32500	-	-	-	0	0	velmi dobrá
	T2	3966	32500	-	-	-			
	T3	3992	32500	-	-	-			
3 DNY	T1	4098	34900	-	-	-	265	0,3	velmi dobrá
	T2	4084	34400	-	-	-			
	T3	4114	34500	-	-	-			
7 DNÍ	T1	4199	36600	-	-	-	58	0,3	velmi dobrá
	T2	4218	36700	-	-	-			
	T3	4234	36600	-	-	-			
28 DNÍ	T1	4023	33600	32000	31800	24900	100	0,3	velmi dobrá
	T2	4048	33800	32500	32300	24500			
	T3	4066	33700	32700	32000	25200			

Tab. 6-7 Hodnoty dynamických a statických modulů pružnosti pro Záměs 3 ( $w = 0,4$ )

		Podélná rychlost [m/s]	Dynamické moduly z rychlosti UZ impulsu [MPa]			Statický modul [MPa]	Směrodatná odchylka [MPa]	Variační koeficient [%]	Stejnomořnost betonu
Stáří	Vzorek	$v_L$	$E_{bu}$	$E_{br,L}$	$E_{br,f}$	$E_c$	$S_x$	$V_x$	
1 DEN	T1	3786	30200	-	-	-	1054	3,6	velmi dobrá
	T2	3722	29300	-	-	-			
	T3	3678	28100	-	-	-			
2 DNY	T1	4157	36400	-	-	-	404	1,1	velmi dobrá
	T2	4111	35700	-	-	-			
	T3	4142	35700	-	-	-			
3 DNY	T1	4214	37400	-	-	-	153	0,4	velmi dobrá
	T2	4218	37600	-	-	-			
	T3	4237	37300	-	-	-			
7 DNÍ	T1	4199	37200	-	-	-	153	0,4	velmi dobrá
	T2	4189	37100	-	-	-			
	T3	4215	36900	-	-	-			
28 DNÍ	T1	4233	37800	35100	32600	27900	351	0,9	velmi dobrá
	T2	4251	38200	35700	33300	28100			
	T3	4248	37500	36000	33700	29100			

Za pomoci směrodatné odchylky a variačního koeficientu impulzové rychlosti šíření UZ vlnění bylo možné stanovit stejnorodost materiálu. Vzhledem k tomu, že hodnota variačního koeficientu  $V_x$  je ve všech záměsích nižší než 10 % znamená to, že stejnoměrnost materiálu je velmi dobrá. Přesto však došlo k určitému kolísání hodnot dynamického modulu pružnosti  $E_{bu}$  v průběhu dozrávání. Pro lepší představu a porovnání je vývoj  $E_{bu}$  znázorněn graficky v následujícím Grafu 6-2.

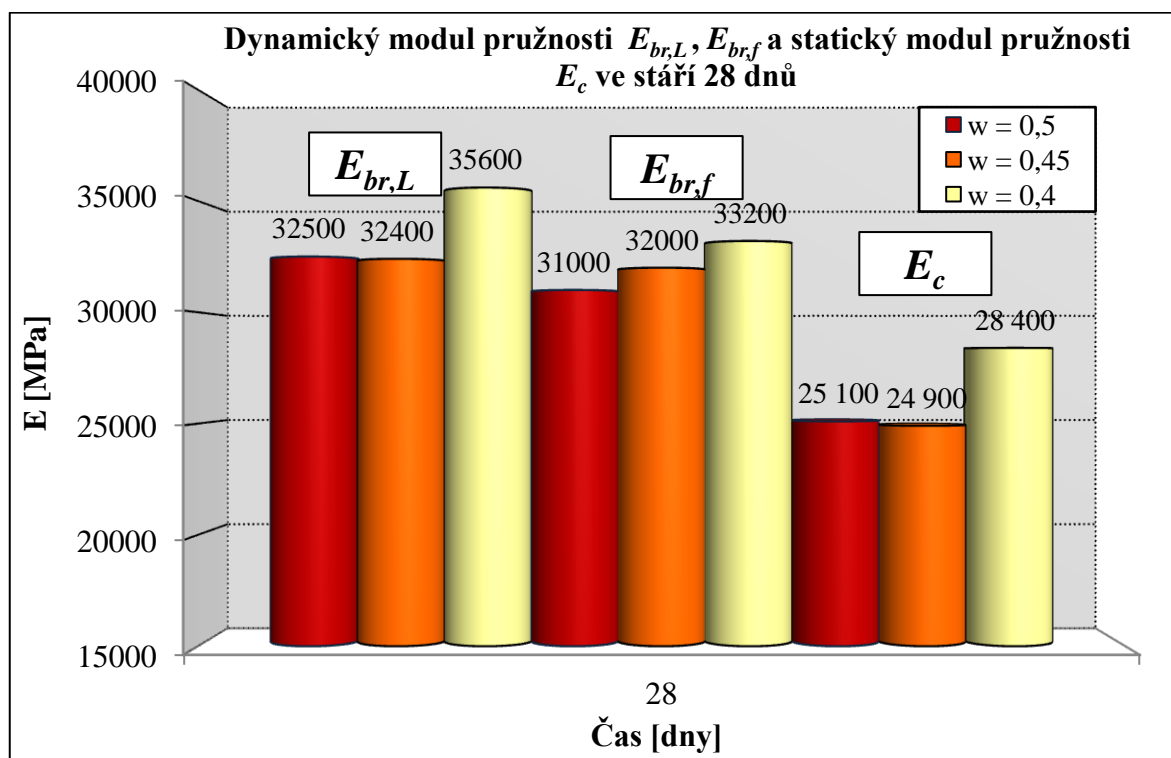


**Graf 6-2** Vývoj dynamického modulu pružnosti betonu v tlaku i tahu ve třech záměsích

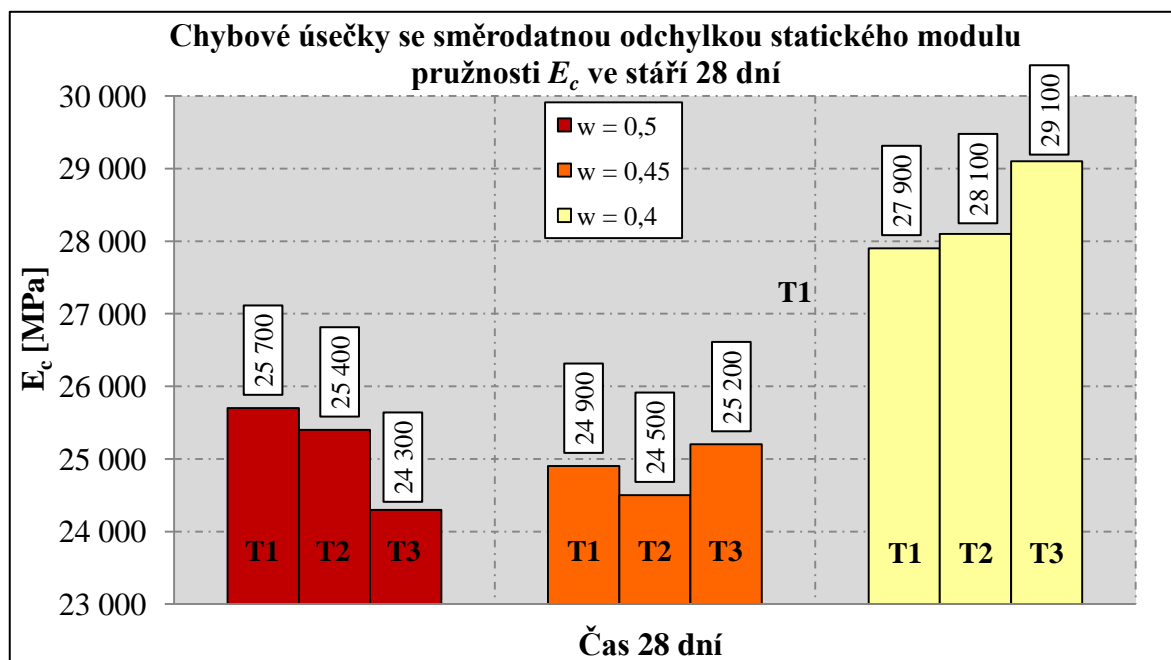
Z grafu je patrné, že v průběhu dozrávání, zvláště u záměsi 2 s vodním součinitelem  $w = 0,45$ , došlo ke snížení hodnoty modulu pružnosti v době mezi 7 a 28 dnů. A to na hodnotu nižší, než byla hodnota ve stáří tří dnů.

Tento jev mohl být způsoben vznikem mikrotrhlin uvnitř zkušebního vzorku, což by mohly potvrdit či vyvrátit výsledky z měření akustických emisí. Avšak pátrání po skutečné příčině poklesu není předmětem této práce.

Jak již bylo výše zmíněno, dynamický modul pružnosti  $E_{br,L}$  a  $E_{br,f}$  spolu se statickým modulem pružnosti  $E_c$ , byly stanoveny pouze ve stáří vzorků 28 dnů. Vypočtené hodnoty modulů z měření jsou uvedeny rovněž graficky v nadcházejícím Grafu 6-3.



**Graf 6-3a** Průměrné hodnoty dynamických modulů pružnosti betonu stanovené rezonancí a průměrné hodnoty statického modulu ve třech záměsích



**Graf 6-3b** Hodnoty statického modulu pružnosti betonu ve stáří 28 dnů

Získané hodnoty dynamického a statického modulu pružnosti posloužily opět jako vstupní parametry pro tvorbu kalibračních vztahů.

### 6.3 Kalibrační vztahy pro stanovení pevnosti betonu v tlaku

Obsahem této kapitoly je popis tvorby a zároveň samotná tvorba kalibračních vztahů pro stanovení očekávané krychelné pevnosti v tlaku  $f_{ce,cube}$  ze známých naměřených hodnot nedestruktivním i destruktivním způsobem.

K vytvoření kalibračních rovnic pro stanovení očekávané krychelné pevnosti betonu v tlaku  $f_{ce,cube}$  bylo zapotřebí hodnot skutečných pevností krychlí  $f_{c,cube}$ , získaných ze zatěžovacího lisu a jednotlivé vstupní údaje získané z nedestruktivního měření ultrazvukem a tvrdoměry, tedy  $v_L$ ,  $a_L$ ,  $a_N$  a  $Q$ . Výpočet byl proveden pomocí matematické analýzy lineární regrese, jejíž princip byl podrobněji popsán v Kapitole 4.2.2.

V případě tvorby kalibračního vztahu pro každou z nedestruktivních metod zvlášť, byly vytvořeny metodou lineární regrese 4 rovnice s jedním vstupním parametrem získaným ultrazvukem a tvrdoměry Schmidt typu L, N a SilverSchmidtem PC N.

Jednotlivé střední hodnoty vstupních parametrů z nepřímého (NDT) měření a z přímého (DT) měření jsou uvedeny v následujících Tabulkách 6-8 až 6-10 a to pro každou záměs zvlášť.

**Tab. 6-8** Vstupní parametry pro stanovení očekávané krychelné pevnosti v tlaku  $f_{ce,cube}$   
Záměs 1, ( $w = 0,5$ )

stáří	vzorek	Objemová hmotnost $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Pevnost v tlaku $f_{c,cube}$ [MPa]	Odraz $a_L$ [-]	Odraz $a_N$ [-]	Úbytek energie $Q$ [-]	Rychlost UZ $v_L$ [km/s]
1 DEN	K1	2280	14	18	22	28,50	3,919
	K2	2250	16	17	21	27,70	4,068
	K3	2260	13	18	22	29,25	3,873
2 DNY	K4	2240	22	20	26	35,35	4,019
	K5	2200	22	21	26	34,50	4,062
	K6	2290	18	21	27	34,70	4,079
3 DNY	K7	2240	29	25	29	37,50	4,148
	K8	2250	28	22	29	37,60	4,107
	K9	2250	24	24	27	34,70	4,105
7 DNÍ	K10	2290	27	24	30	38,10	4,066
	K11	2300	31	25	31	38,35	4,148
	K12	2240	32	26	32	39,25	4,126
28 DNÍ	K13	2280	50	33	36	44,80	4,238
	K14	2270	45	34	37	44,50	4,261
	K15	2280	48	34	35	46,60	4,337
90 DNÍ	K16	2260	51	36	36	48,20	4,163
	K17	2290	59	36	38	49,35	4,218
	K18	2270	46	35	37	45,80	4,274

**Tab. 6-9** Vstupní parametry pro stanovení očekávané krychelné pevnosti v tlaku  $f_{ce,cube}$ Záměs 2, ( $w = 0,45$ )

stáří	vzorek	Objemová hmotnost $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Pevnost v tlaku $f_{c,cube}$ [MPa]	Odraz $a_L$ [-]	Odraz $a_N$ [-]	Úbytek energie $Q$ [-]	Rychlost UZ $v_L$ [km/s]
1 DEN	K1	2260	20	17	22	28,70	3,875
	K2	2280	22	19	21	30,60	3,916
	K3	2250	17	11	22	22,10	3,822
2 DNY	K4	2270	24	20	25	31,85	4,051
	K5	2270	24	19	22	29,55	4,081
	K6	2290	27	20	26	33,40	4,077
3 DNY	K7	2260	34	21	26	34,15	4,230
	K8	2280	35	21	28	37,65	4,206
	K9	2280	35	18	25	34,25	4,194
7 DNÍ	K10	2290	40	26	31	42,10	4,262
	K11	2270	38	25	32	41,40	4,223
	K12	2280	53	33	33	44,50	4,307
28 DNÍ	K13	2320	81	30	41	57,90	4,122
	K14	2310	79	31	39	53,65	4,133
	K15	2310	80	32	37	55,85	4,142
90 DNÍ	K16	2290	64	38	40	51,15	4,297
	K17	2340	90	45	46	59,00	4,167
	K18	2340	92	43	48	60,15	4,159

**Tab. 6-10** Vstupní parametry pro stanovení očekávané krychelné pevnosti v tlaku  $f_{ce,cube}$ Záměs 3, ( $w = 0,4$ )

stáří	vzorek	Objemová hmotnost $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Pevnost v tlaku $f_{c,cube}$ [MPa]	Odraz $a_L$ [-]	Odraz $a_N$ [-]	Úbytek energie $Q$ [-]	Rychlost UZ $v_L$ [km/s]
1 DEN	K1	2350	22	22	26	31,75	3,879
	K2	2330	20	20	23	29,95	3,786
	K3	2330	21	20	24	33,35	3,776
2 DNY	K4	2310	40	27	30	40,50	4,182
	K5	2270	39	28	31	40,80	4,138
	K6	2370	41	26	31	38,75	4,250
3 DNY	K7	2320	46	25	32	43,45	4,217
	K8	2340	50	31	34	45,50	4,314
	K9	2340	51	27	34	42,55	4,278
7 DNÍ	K10	2350	62	24	30	49,25	4,340
	K11	2290	61	26	30	49,10	4,327
	K12	2320	66	25	30	49,55	4,220
28 DNÍ	K13	2320	78	28	40	56,95	4,261
	K14	2320	75	31	36	55,80	4,336
	K15	2350	78	34	33	55,85	4,298
90 DNÍ	K16	2348	89	46	49	62,95	4,136
	K17	2339	90	48	48	62,95	4,157
	K18	2332	76	45	46	60,20	4,225

### 6.3.1 Stanovení očekávané pevnosti betonu v tlaku $f_{ce,cube}$ z jednotlivých metod

Jak již bylo výše zmíněno, v případě že se jedná o jednotlivé metody měření zvlášť, bylo zapotřebí vytvořit 4 kalibrační rovnice s jedním vstupním parametrem. Tudíž jednou pro metodu ultrazvukovou a třikrát pro metodu tvrdoměrnou.

Pro výpočet regresní rovnice a přímky je zapotřebí vhodně a především správně zvolit vstupní údaje z naměřených parametrů. Závisle proměnná hodnota náhodné veličiny je  $Y$ , neboli hodnota z destruktivního měření  $f_{c,cube}$ . Nezávisle proměnné hodnoty náhodného vektoru  $X$  představují naopak vstupní parametry z nedestruktivního měření, tudíž hodnoty odrazu  $a_L$ ,  $a_N$ ,  $Q$  a rychlost ultrazvukového vlnění  $v_L$ .

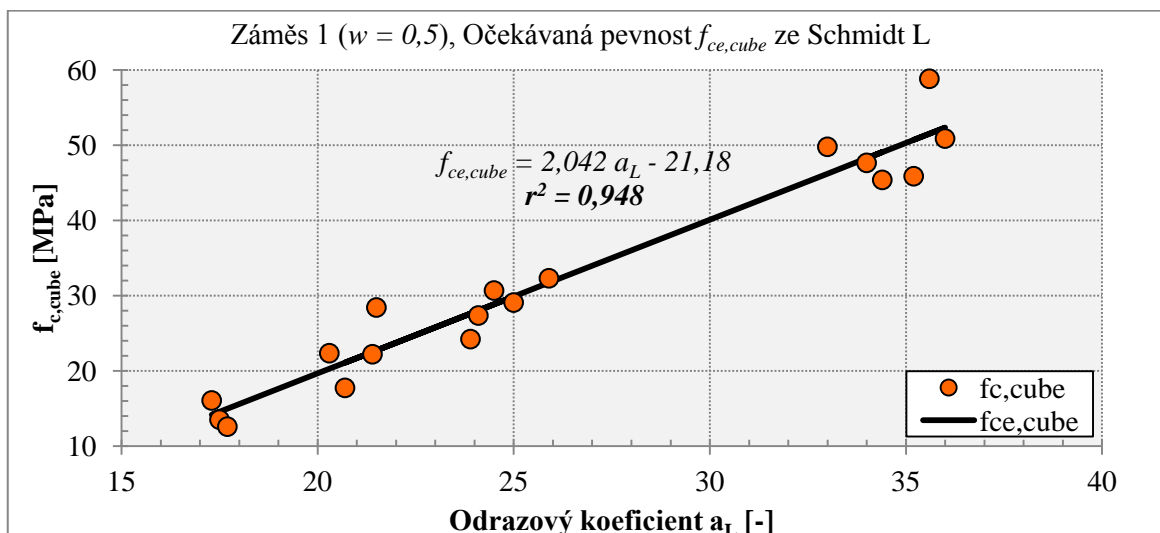
#### Vstupní údaje

$Y$	= $f_{c,cube}$ ... krychelná pevnost betonu v tlaku získaná destruktivním měřením [MPa]
$X_1$	= $a_L$ ... hodnota odrazu Schmidtovým tvrdoměrem typu L [-]
$X_2$	= $a_N$ ... hodnota odrazu Schmidtovým tvrdoměrem typu N [-]
$X_3$	= $Q$ ... hodnota podílu energií tvrdoměrem SilverSchmidt PC-N [-]
$X_4$	= $v_L$ ... rychlost UZ vlnění [km/s]

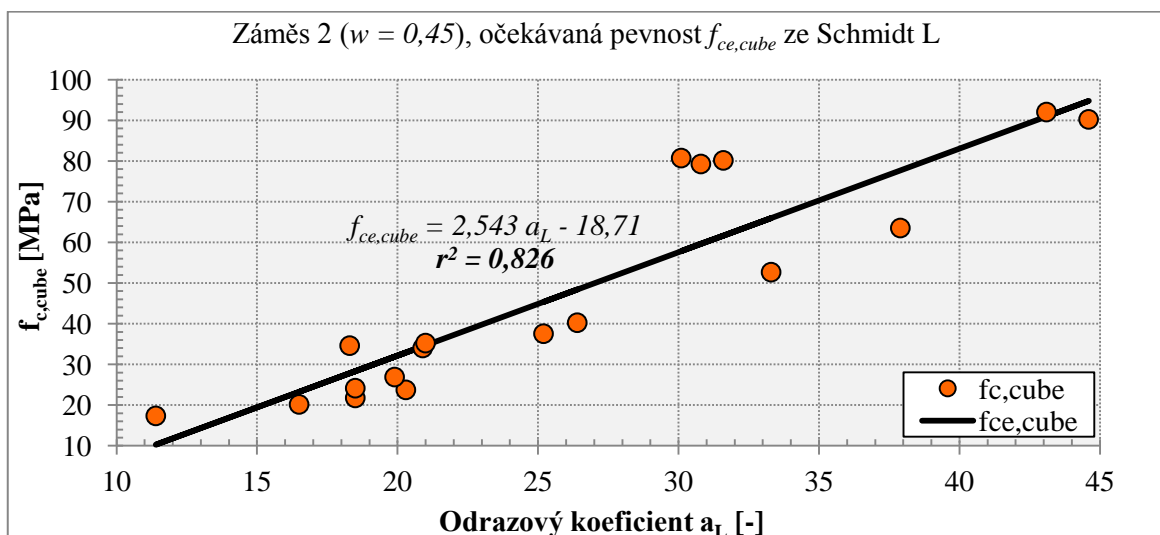
Na základě naměřených hodnot byly následně vytvořeny kalibrační vztahy pomocí funkce LINREGRESE, založené na metodě nejmenších čtverců, programem MS Excel. Kromě součinitele regrese  $r$ , respektive součinitele determinace  $r^2$ , byly stanoveny rovněž statistiky  $t_j$  pro testování hypotézy, že se daný parametr rovná nule a příslušné  $p$  – hodnoty [1-7].

Součinitel determinace  $r^2$  udává, s jakou přesností se blíží hodnota vypočtené krychelné pevnosti v tlaku  $f_{ce,cube}$  ke skutečné hodnotě  $f_{c,cube}$ .

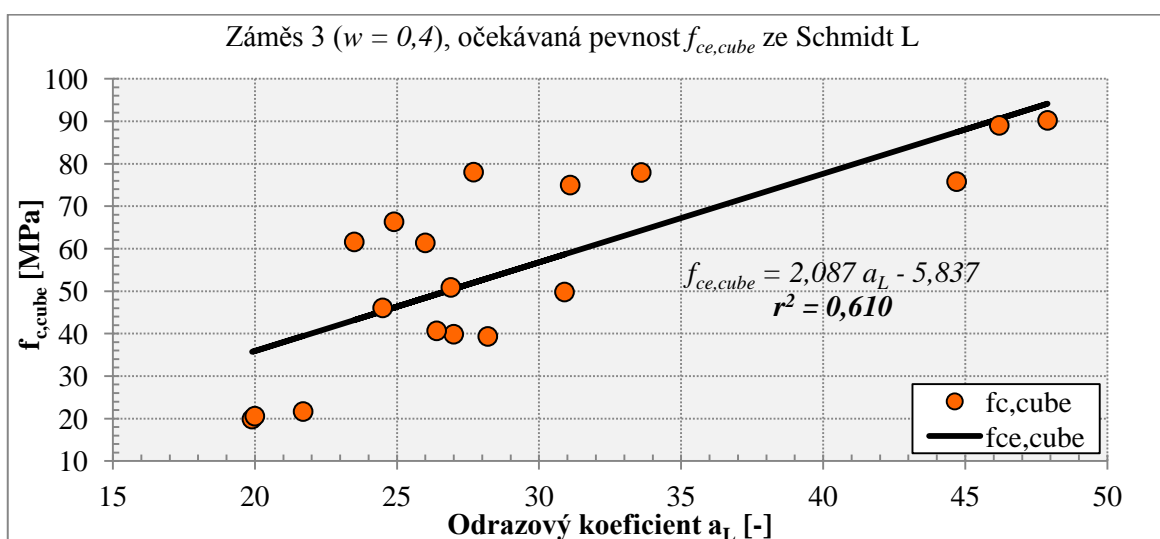
Výsledky regresního výpočtu jsou graficky znázorněny pro každý přístroj a záměs zvlášť v následujících Grafech 6-4 až 6-15 a shrnutí průběhů těchto grafů je slovně popsáno na str. 50, 51.



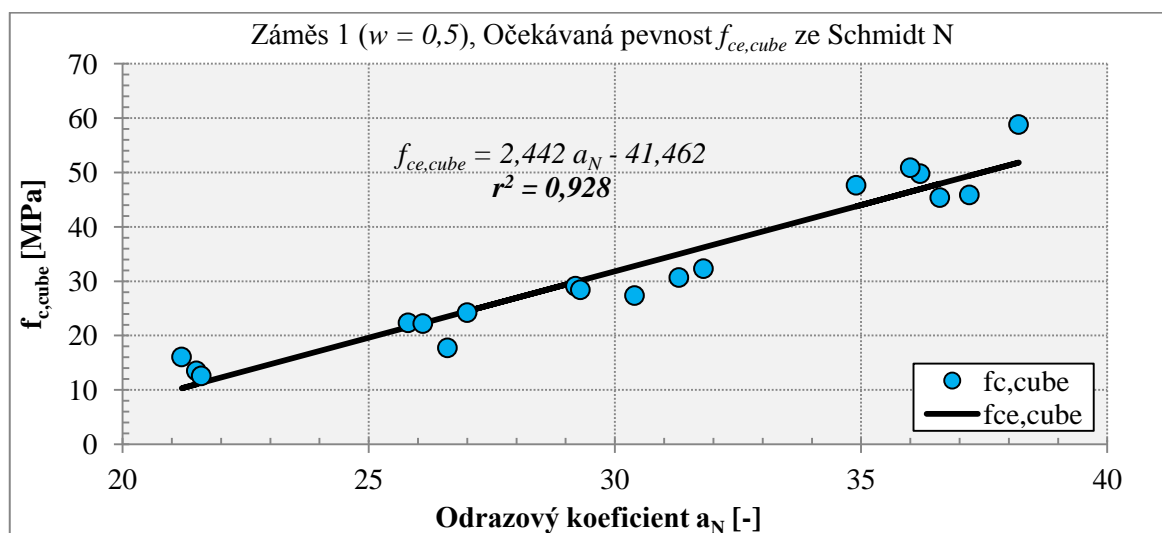
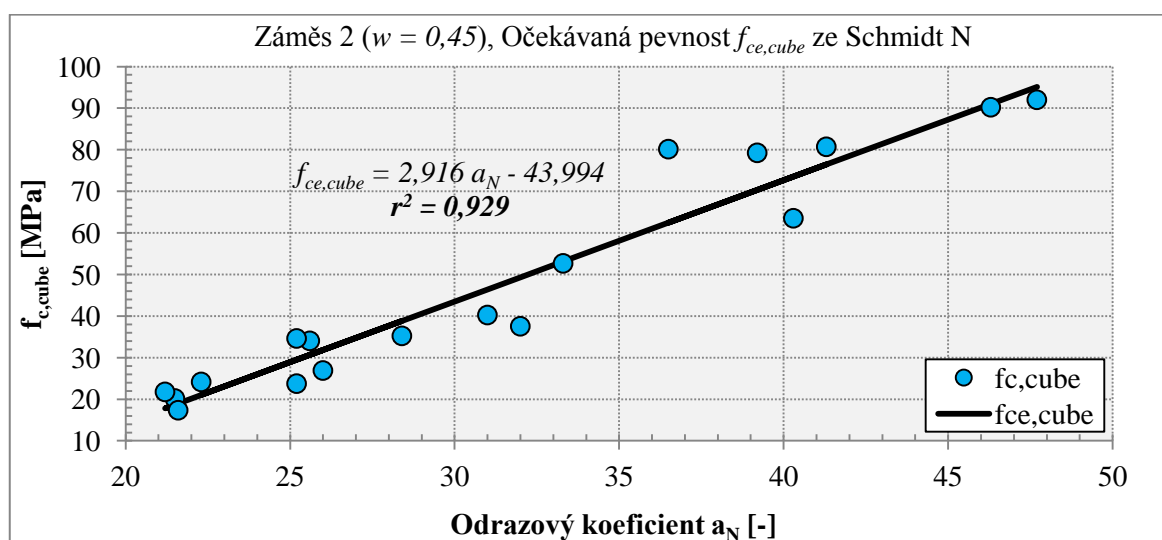
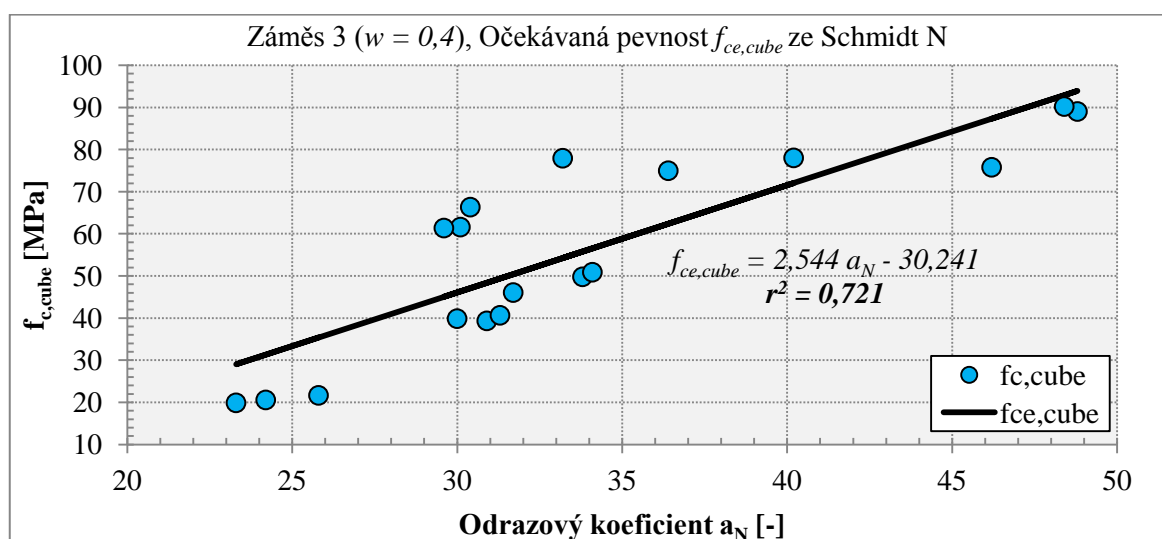
**Graf 6-4** Výpočet očekávané pevnosti v tlaku  $f_{ce,cube}$  z hodnot odrazu  $a_L$  pro  $w = 0,5$



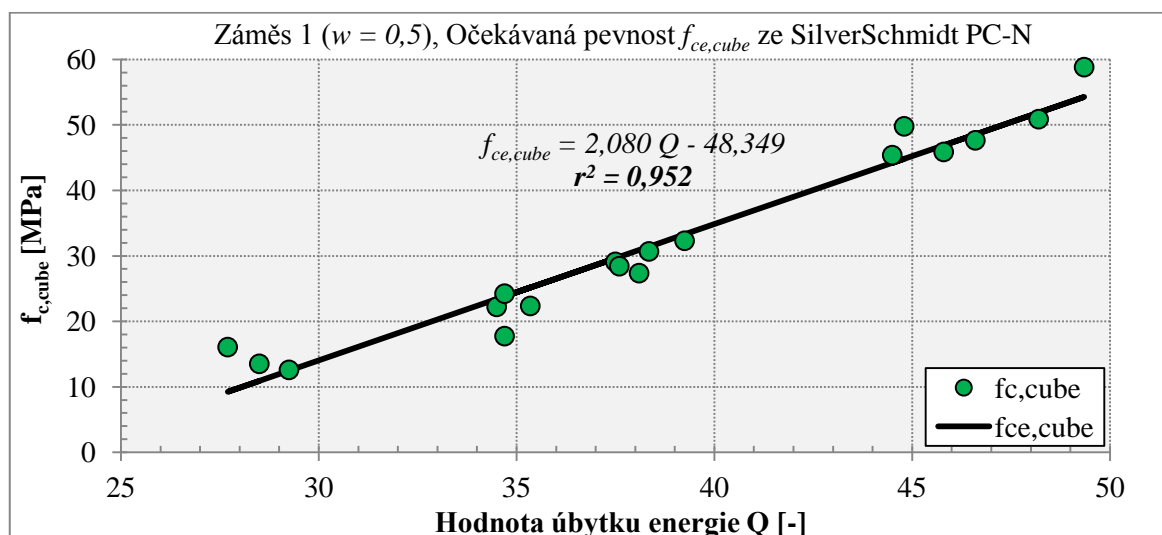
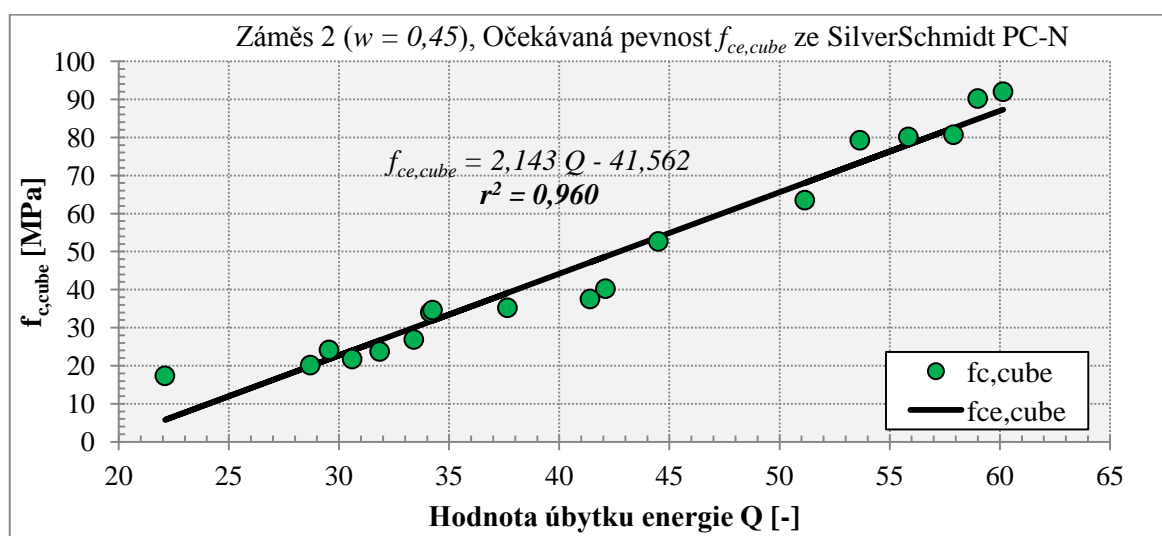
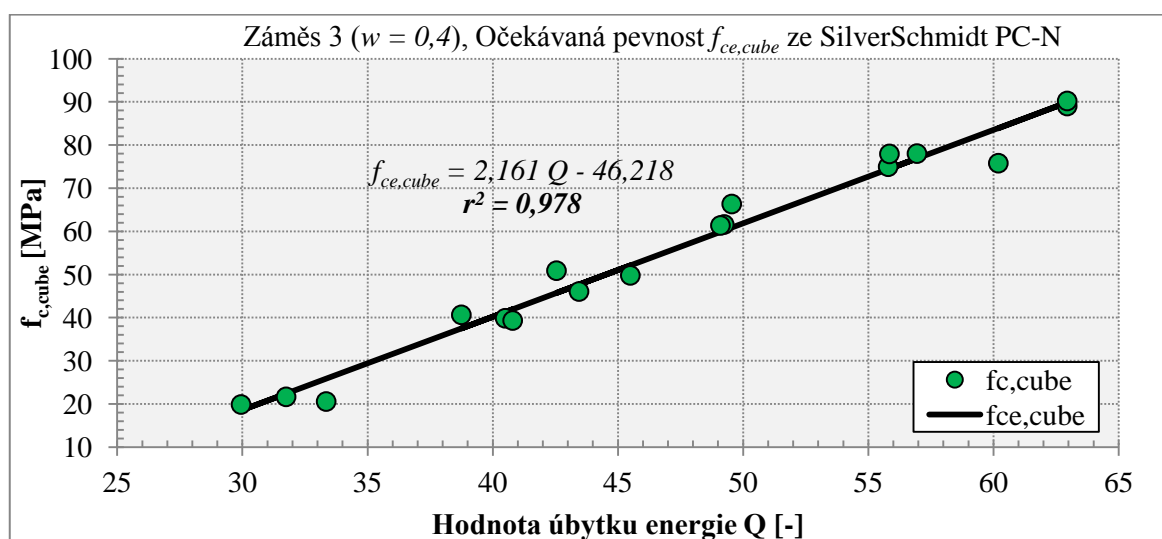
**Graf 6-5** Výpočet očekávané pevnosti v tlaku  $f_{ce,cube}$  z hodnot odrazu  $a_L$  pro  $w = 0,45$

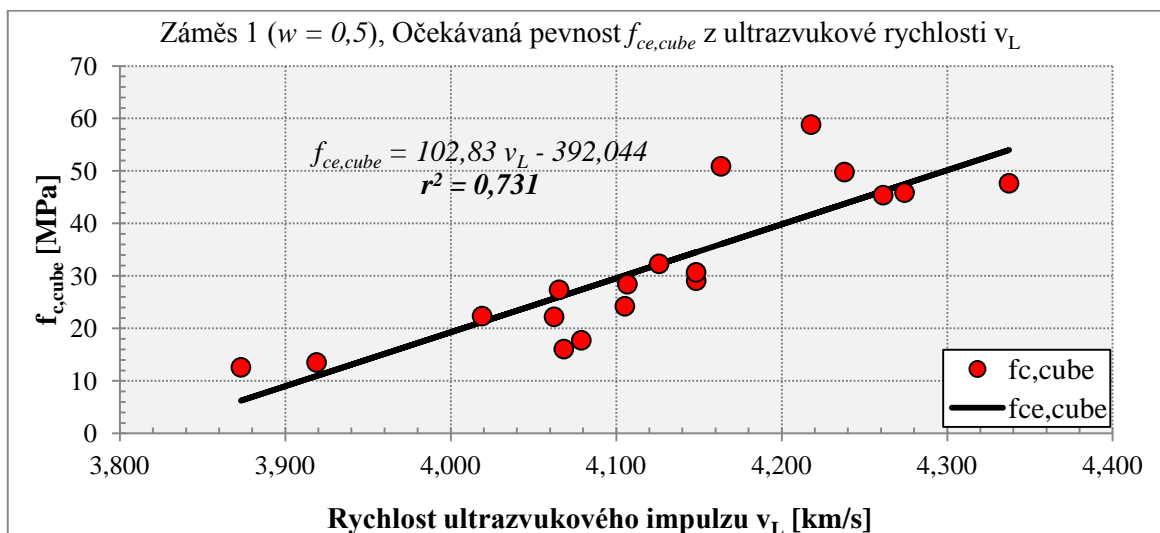
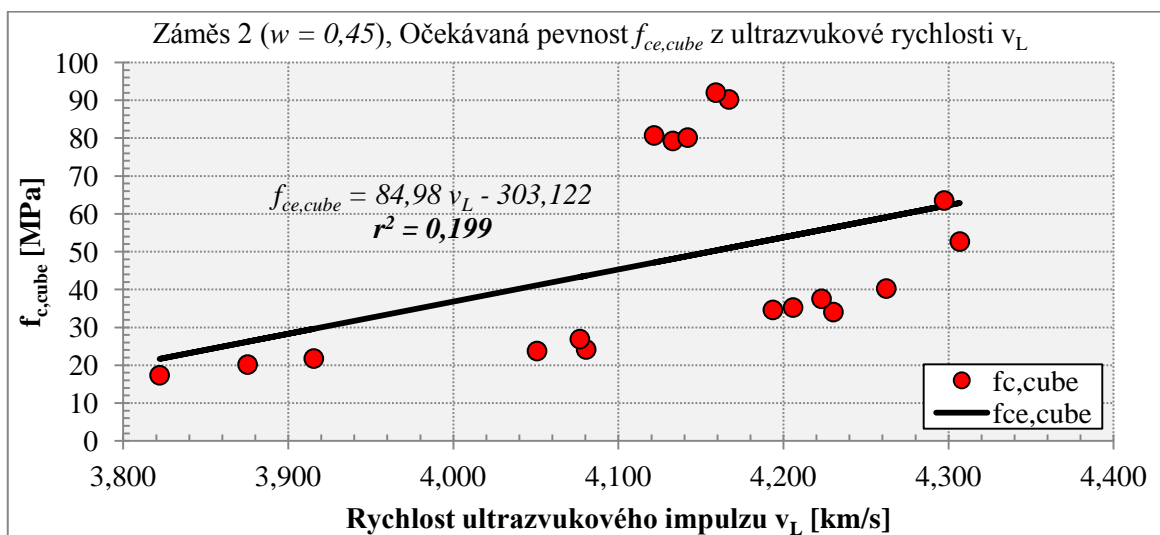
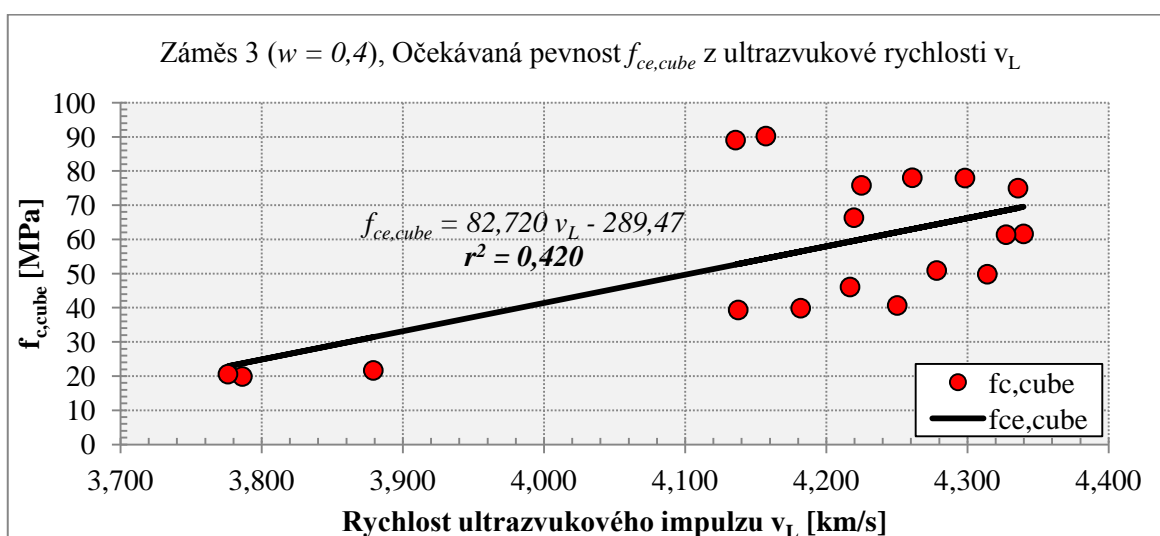


**Graf 6-6** Výpočet očekávané pevnosti v tlaku  $f_{ce,cube}$  z hodnot odrazu  $a_L$  pro  $w = 0,4$

Graf 6-7 Výpočet očekávané pevnosti v tlaku  $f_{ce,cube}$  z hodnot odrazu  $a_N$  pro  $w = 0,5$ Graf 6-8 Výpočet očekávané pevnosti v tlaku  $f_{ce,cube}$  z hodnot odrazu  $a_N$  pro  $w = 0,45$ Graf 6-9 Výpočet očekávané pevnosti v tlaku  $f_{ce,cube}$  z hodnot odrazu  $a_N$  pro  $w = 0,40$



Graf 6-10 Výpočet očekávané pevnosti v tlaku  $f_{ce,cube}$  z hodnot ztráty energie  $Q$  pro  $w = 0,5$ Graf 6-11 Výpočet očekávané pevnosti v tlaku  $f_{ce,cube}$  z hodnot ztráty energie  $Q$ ,  $w = 0,45$ Graf 6-12 Výpočet očekávané pevnosti v tlaku  $f_{ce,cube}$  z hodnot ztráty energie  $Q$  pro  $w = 0,4$

Graf 6-13 Výpočet očekávané pevnosti v tlaku  $f_{ce,cube}$  z UZ rychlosti  $v_L$  pro  $w = 0,5$ Graf 6-14 Výpočet očekávané pevnosti v tlaku  $f_{ce,cube}$  z UZ rychlosti  $v_L$  pro  $w = 0,45$ Graf 6-15 Výpočet očekávané pevnosti v tlaku  $f_{ce,cube}$  z UZ rychlosti  $v_L$  pro  $w = 0,4$

### 6.3.1.1 Shrnutí kalibračních grafů pro jednotlivé NDT metody zvlášť

#### Tvrdoměr Schmidt typu L

V první záměsi s vodním součinitelem  $w = 0,5$  (Graf 6-4) bylo měření tvrdoměrem typu L relativně přesné a to ve všech časových etapách, kde hodnota regresní závislosti vyšla  $r^2 = 0,948$ .

Naopak u druhé a třetí záměsi (Grafy 6-5, 6-6) byla přesnost měření již výrazně nižší a to i v počátečním stáří betonu. Hodnota regresní závislosti konkrétně vyšla  $r^2 = 0,826$  v případě druhé záměsi a  $r^2 = 0,610$  v případě třetí záměsi. Tento pokles byl způsoben pravděpodobně redukcí vodního součinitele a zároveň rozdílným zvýšením povrchové tvrdosti materiálu, na kterou tvrdoměr Schmidt typu L není konstruován.

#### Tvrdoměr Schmidt typu N

Hodnota regresní závislosti tvrdoměru Schmidt typu N a krychelné pevnosti v prvních dvou záměsích (Graf 6-7, 6-8) je relativně vysoká, konkrétně  $r^2 = 0,928$  a  $r^2 = 0,929$ . V případě třetí záměsi (Graf 6-9) se přesnost závislosti výrazně snížila a to na  $r^2 = 0,721$ .

To pravděpodobně způsobila rovněž redukce vodního součinitele (na  $w = 0,40$ ), kdy materiál začal vykazovat vyšší a rozdílnou povrchovou tvrdost zkušebních krychlí v jednotlivých časových etapách.

#### Tvrdoměr SilverSchmidt PC-N

Oproti tvrdoměrům typu L a N se SilverSchmidt PC-N ve všech třech záměsích (Grafy 6-10 až 6-12) jevil jako nejlepší a vykazoval nejvyšší závislost mezi měřeným tvrdoměrným koeficientem  $Q$  a krychelnou pevností  $f_{c,cube}$ . Přesnost součinitele determinace rostla v závislosti na redukcí vodního součinitele. V případě třetí záměsi s vodním součinitelem  $w = 0,40$  byla přesnost nejvyšší a to konkrétně  $r^2 = 0,978$ .

Tyto výsledky jsou v porovnání s výsledky tvrdoměrů L a N velmi uspokojivé a zdá se, že nejen v případě běžných betonů [1-10], ale i v případě alkalicky aktivovaných betonů, má tvrdoměr SilverSchmidt PC-N vysoký potenciál uplatnění a využití.

### Ultrazvukové zařízení PUNDIT

Jako nejméně přesný nedestruktivní přístroj v experimentu se jevil ultrazvuk, který vykazoval nejnížší závislost a to konkrétně mezi rychlostí UZ impulsu  $v_L$  a krychelnou pevností  $f_{c,cube}$ .

Regresní závislost ultrazvuku je nízká ve všech třech záměsích, avšak oproti tvrdoměrům neklesá plynule ale spíše nepravidelně. Nejvyšší součinitel determinace je u záměsi první  $r^2 = 0,731$  (Graf 6-13). Naopak nejnížší součinitel determinace je překvapivě u záměsi druhé (Graf 6-14) s vodním součinitelem  $w = 0,45$  a to  $r^2 = 0,199$ . A v případě třetí záměsi (Graf 6-15), s vodním součinitelem nejnížším  $w = 0,40$ , míra závislosti vzrostla na  $r^2 = 0,420$ .

Tento kolísavý vývoj přesnosti měření je pravděpodobně způsoben rozdílným vznikem mikrotrhlin uvnitř zkušebních hranolů u jednotlivých záměsích. Jedná se ovšem pouze o předpoklad a skutečný důvod není předmětem této práce.

### 6.3.2 Stanovení očekávané pevnosti betonu v tlaku $f_{ce,cube}$ z kombinace metod

V této kapitole se pojednává o vytvoření kalibračního vztahu z kombinace tvrdoměrné metody s ultrazvukovou impulsovou metodou. Vzhledem k nízké regresní závislosti ultrazvuku (Grafy 6-13 až 6-15) se předpokládá, že v kombinaci s tvrdoměry ultrazvuk nijak výrazně nezvýší součinitel determinace  $r^2$ .

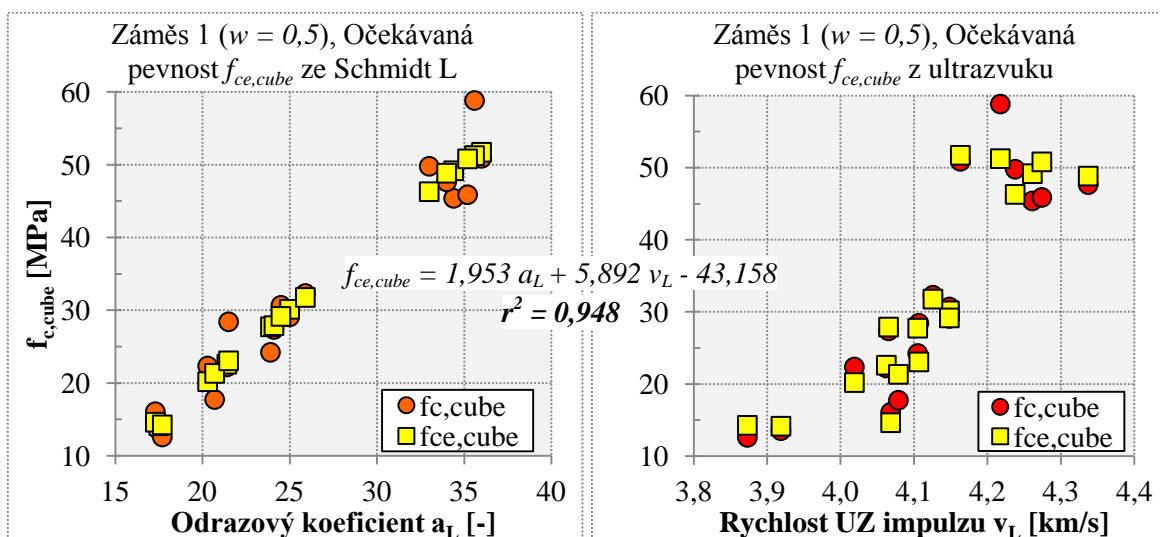
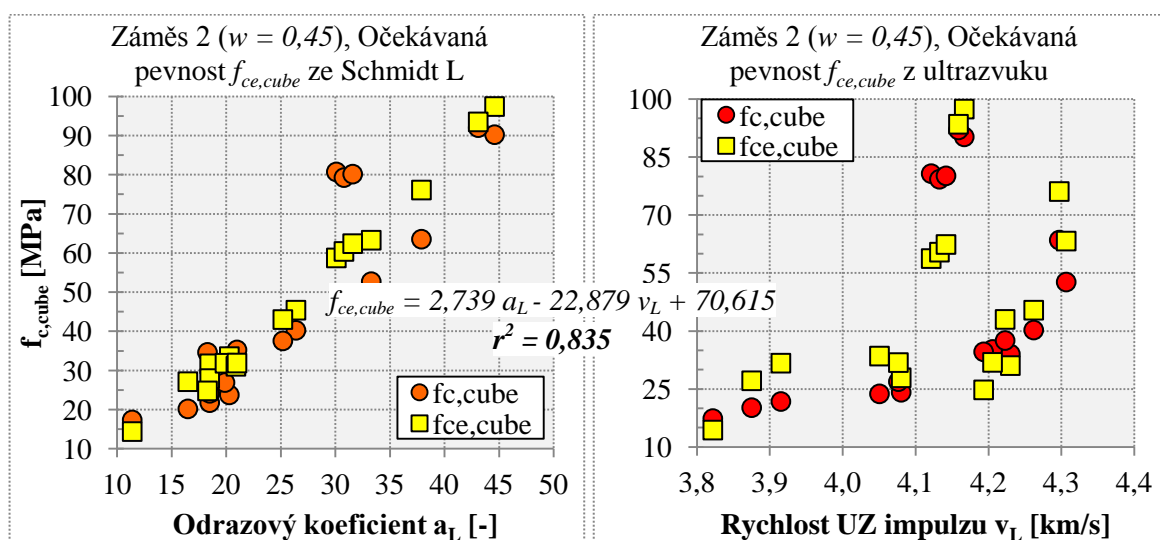
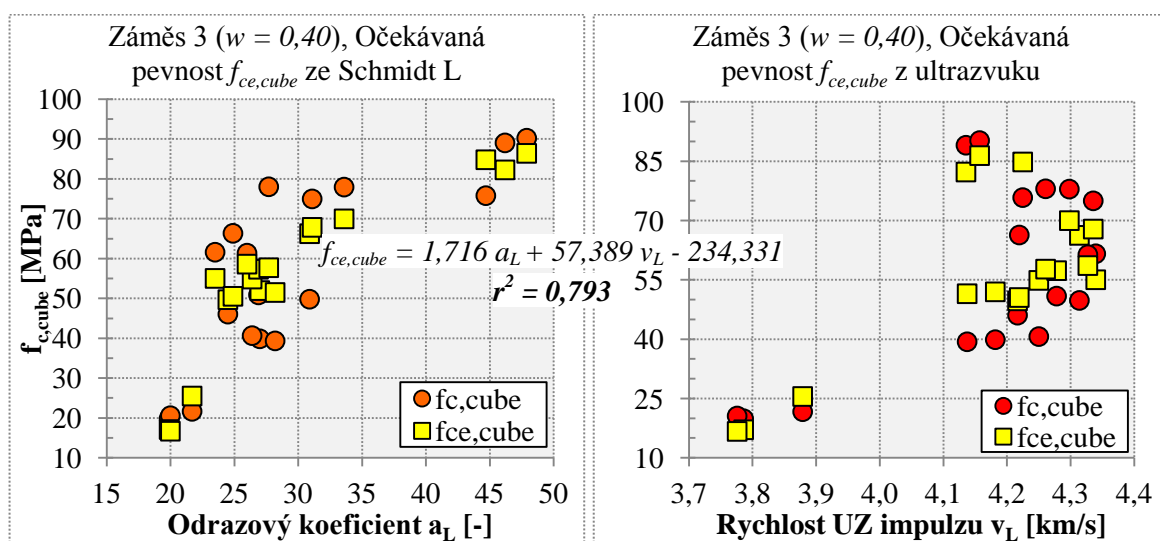
V základě se jedná o stejný princip, který byl použit v předchozí kapitole. Závisle proměnnou hodnotu náhodné veličiny  $Y$  představuje opět hodnota z destruktivního měření  $f_{c,cube}$ . Nezávisle proměnné hodnoty náhodného vektoru  $X$  představují vstupní parametry z nedestruktivního tvrdoměrného měření  $a_L$ ,  $a_N$  a  $Q$ , avšak v kombinaci s hodnotami ultrazvukové rychlosti  $v_L$ . Proto je nutné do výpočtu regresní analýzy tyto hodnoty zadat současně.

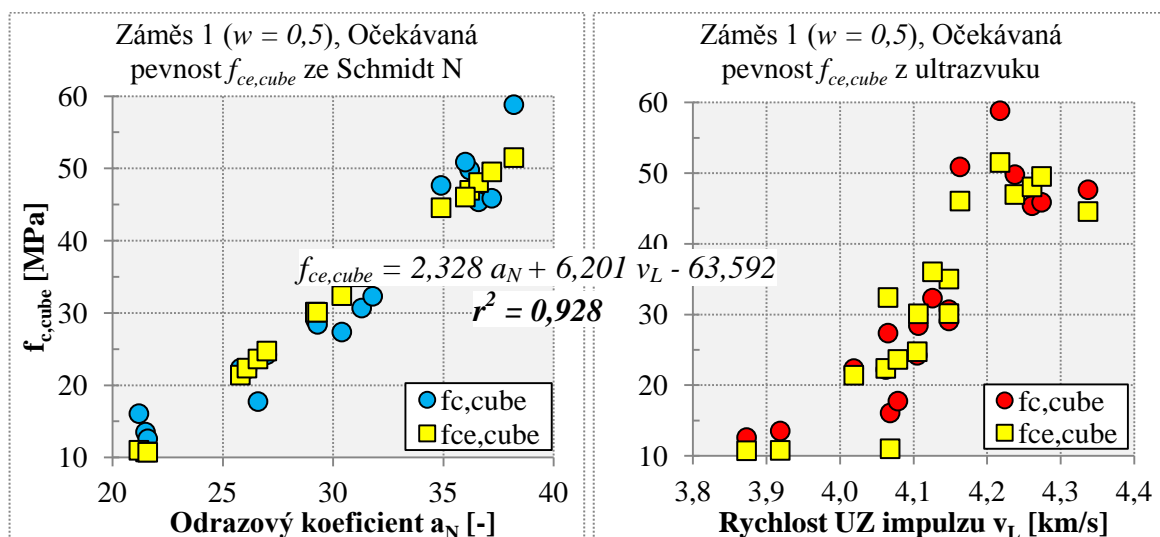
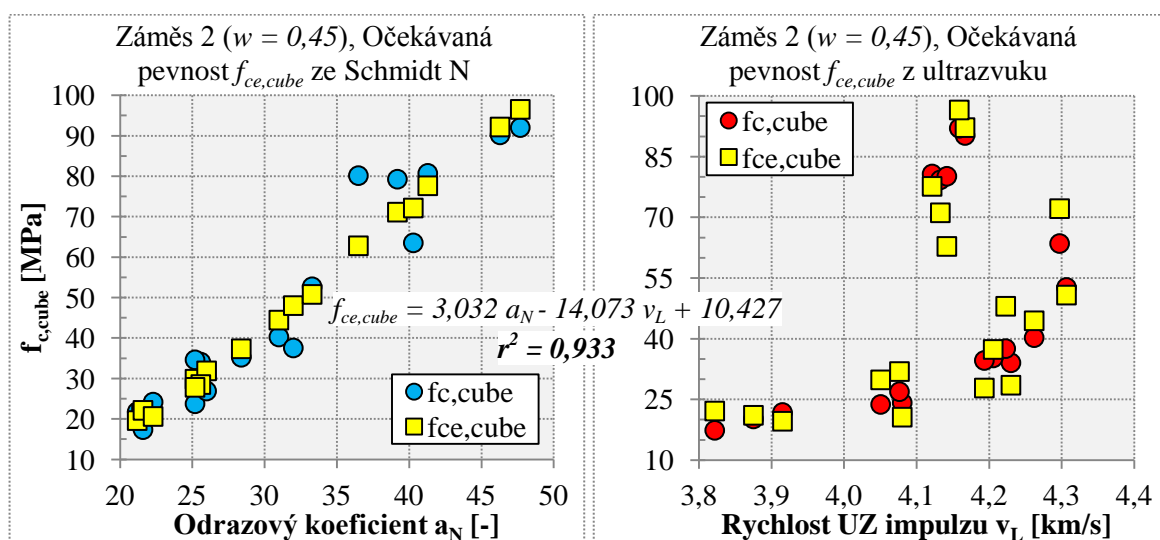
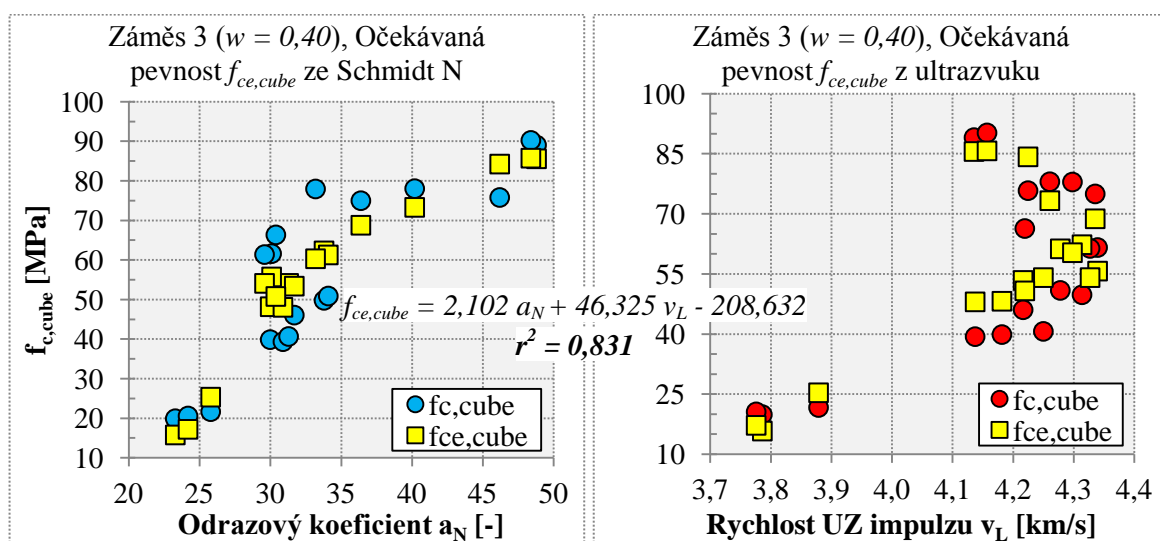
#### Vstupní údaje

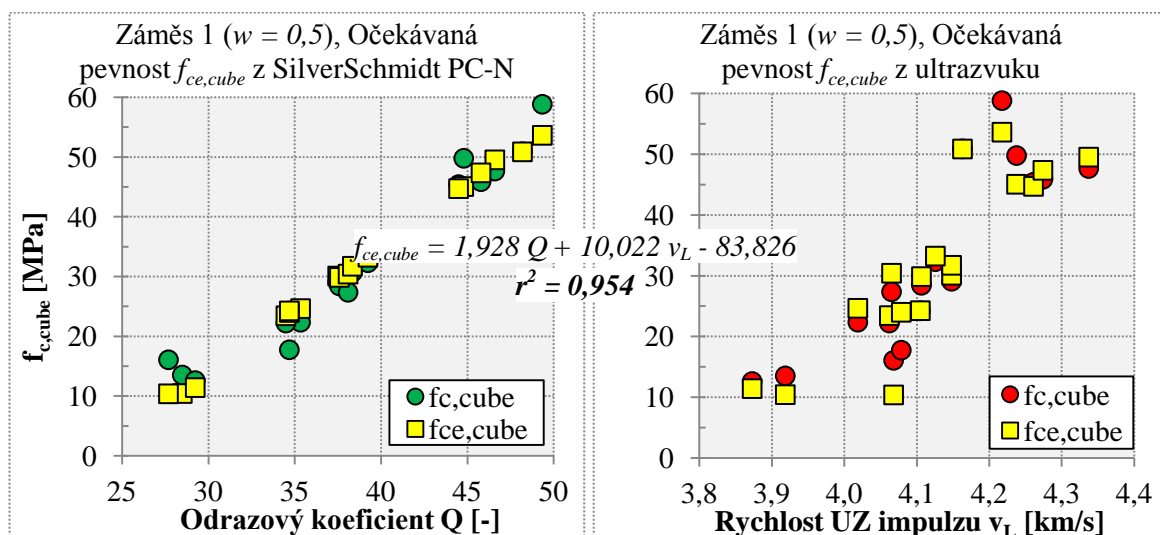
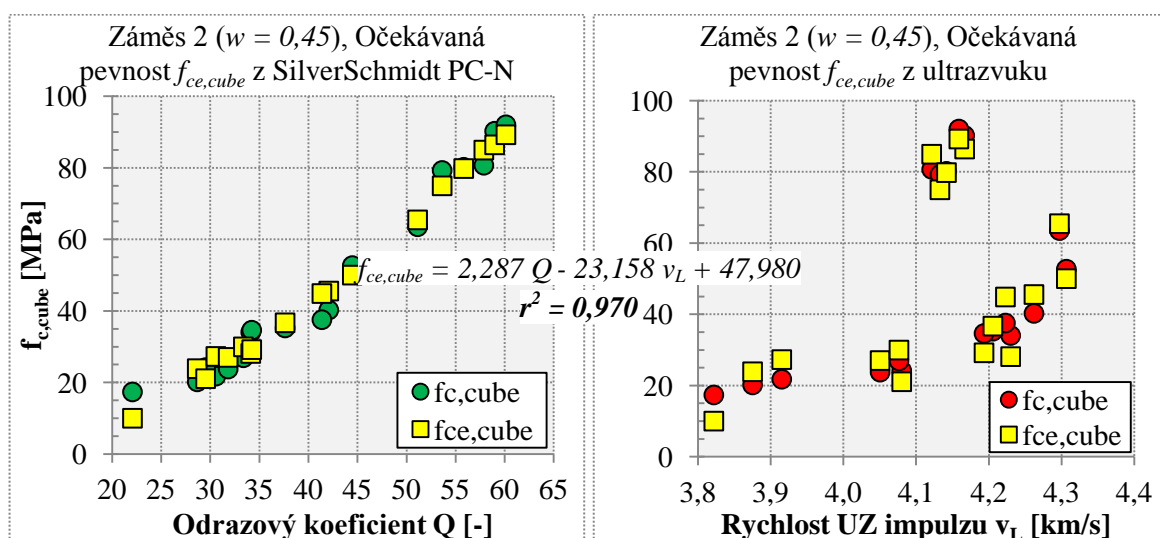
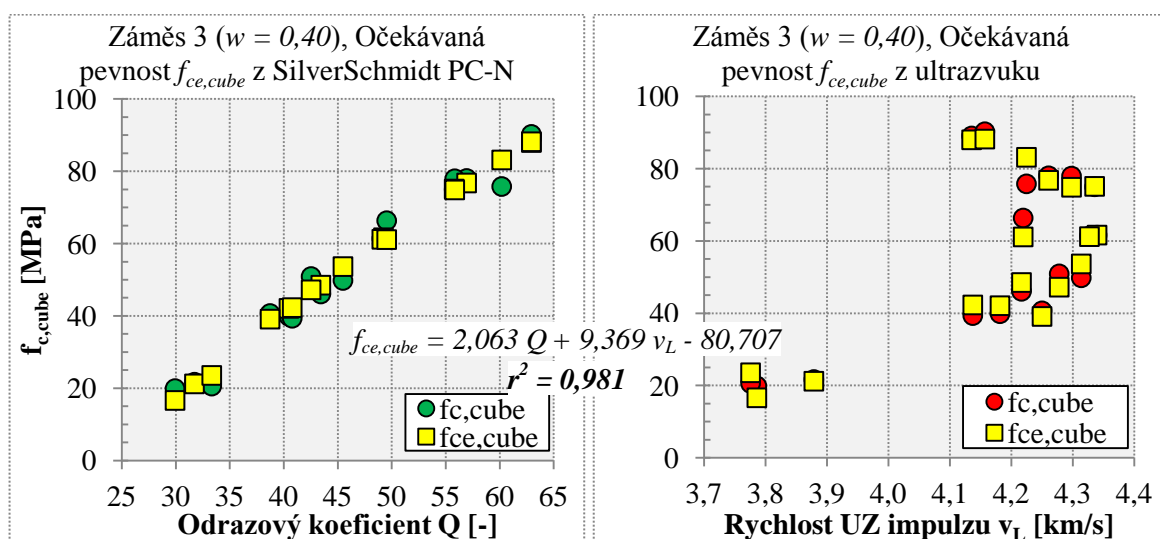
- $Y$  =  $f_{c,cube}$  ... krychelná pevnost betonu v tlaku získaná destruktivním měřením [MPa]  
 $X_1$  =  $a_L + v_L$  ... hodnota odrazu Schmidtovým tvrdoměrem typu L [-] + rychlost UZ vlnění [km/s]  
 $X_2$  =  $a_N + v_L$  ... hodnota odrazu Schmidtovým tvrdoměrem typu N [-] + rychlost UZ vlnění [km/s]  
 $X_3$  =  $Q + v_L$  ... hodnota podílu energií tvrdoměrem SilverSchmidt PC-N [-] + rychlost UZ vlnění [km/s]

Po zadání vstupních údajů byly vytvořeny kalibrační vztahy opět pomocí funkce LINREGRESE, založené na metodě nejmenších čtverců, programem MS Excel. Celkem se tedy jedná o tři určující kalibrační vztahy, jejichž vstupní parametry představují hodnoty odrazu a rychlost ultrazvukového vlnění.

Výsledky regresního výpočtu jsou graficky znázorněny pro každý tvrdoměr v kombinaci s ultrazvukem a jednotlivou záměs zvlášť v příslušných grafech na následujících stránkách.

Graf 6-16 Očekávaná pevnost v tlaku  $f_{ce,cube}$  z hodnoty odrazu  $a_L$  a UZ rychlosti  $v_L$  ( $w=0,5$ )Graf 6-17 Očekávaná pevnost v tlaku  $f_{ce,cube}$  z odrazu  $a_L$  a UZ rychlosti  $v_L$  ( $w=0,45$ )Graf 6-18 Očekávaná pevnost v tlaku  $f_{ce,cube}$  z hodnoty odrazu  $a_L$  a UZ rychlosti  $v_L$  ( $w=0,4$ )

Graf 6-19 Očekávaná pevnost v tlaku  $f_{ce,cube}$  z hodnoty odrazu  $a_N$  a UZ rychlosti  $v_L$  ( $w=0,5$ )Graf 6-20 Očekávaná pevnost v tlaku  $f_{ce,cube}$  z odrazu  $a_N$  a UZ rychlosti  $v_L$  ( $w=0,45$ )Graf 6-21 Očekávaná pevnost v tlaku  $f_{ce,cube}$  z hodnoty odrazu  $a_N$  a UZ rychlosti  $v_L$  ( $w=0,4$ )

Graf 6-22 Očekávaná pevnost v tlaku  $f_{ce,cube}$  z úbytku energie  $Q$  a UZ rychlosti  $v_L$  ( $w=0,5$ )Graf 6-23 Očekávaná pevnost v tlaku  $f_{ce,cube}$  z úbytku energie  $Q$  a UZ rychlosti  $v_L$  ( $w=0,45$ )Graf 6-24 Očekávaná pevnost v tlaku  $f_{ce,cube}$  z úbytku energie  $Q$  a UZ rychlosti  $v_L$  ( $w=0,4$ )



### 6.3.2.1 Shrnutí kalibračních grafů vycházejících z kombinace NDT metod

Grafy 6-16 až 6-24 ukazují na počáteční předpoklad, že u kalibračního vztahu vycházejícího z kombinace ultrazvuku a tvrdoměrů nijak výrazně nevzroste součinitel determinace regresní analýzy  $r^2$ . V případě třetí záměsi s vodním součinitelem  $w = 0,4$  došlo k navýšení součinitele determinace zhruba o 10% v kombinaci UZ + Schmidt L a UZ + Schmidt N (Graf 6-18, 6-21). V kombinaci UZ s tvrdoměrem SilverSchmidt PC-N došlo ke zvýšení součinitele determinace  $r^2$  rovněž ve třetí záměsi, ale zhruba pouze o 1%.

Po těchto výsledcích lze konstatovat, že z hlediska přesnosti měření a zároveň jednodušší manipulace a aplikace se jako nejlepší z použitých nedestruktivních přístrojů jeví tvrdoměr SilverSchmidt PC-N.

### 6.3.3 Stanovení obecné rovnice očekávané pevnosti betonu v tlaku $f_{ce,cube}$

Doposud není nikde uvedena obecná kalibrační rovnice pro určení očekávané krychelné pevnosti v tlaku alkalicky aktivovaného betonu. Proto se nabízí možnost využít výsledků, které byly získány měřením na třech záměsích lišících se ve vodním součiniteli. Vzhledem k tomu, že se bude jednat o obecný kalibrační vztah s přesností nižší než 100 %, je nutné uvažovat výsledky s rezervou.

Závisle proměnnou hodnotu náhodné veličiny  $Y$  představuje opět hodnota z destruktivního měření  $f_{c,cube}$  v MPa. Nezávisle proměnné hodnoty náhodného vektoru  $X$  představují vstupní parametry z nedestruktivního tvrdoměrného měření  $a_N$  a  $Q$ , ale složené ze všech záměsů dohromady. V principu se provede výpočet úplně stejně jako v předešlých situacích, s rozdílem že místo původních 18 + 18 vstupních hodnot bude zadáno 54 + 54 hodnot.

I přesto, že SilverSchmidt PC-N vykazuje nejvyšší přesnost měření v porovnání s ostatními tvrdoměry Schmidt, je vhodné vzhledem k jeho zatím nižší rozšířenosti v oboru, vytvořit obecný kalibrační vztah i pro tvrdoměr typu N.

#### Vstupní údaje

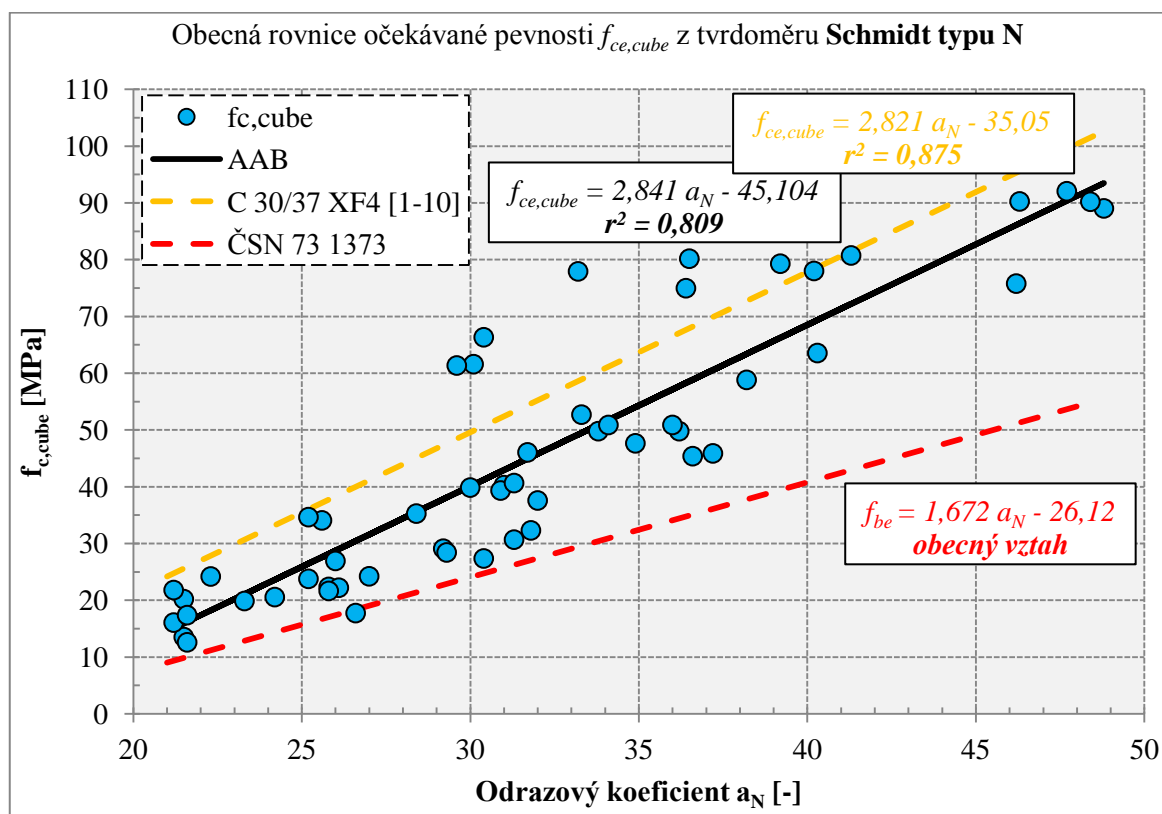
$Y$  =  $f_{c,cube}$ ...krychelná pevnost betonu v tlaku získaná destruktivním měřením na všech záměsích dohromady [MPa]

$X_1$  =  $a_N$  ... hodnota odrazu Schmidtovým tvrdoměrem typu N [-]

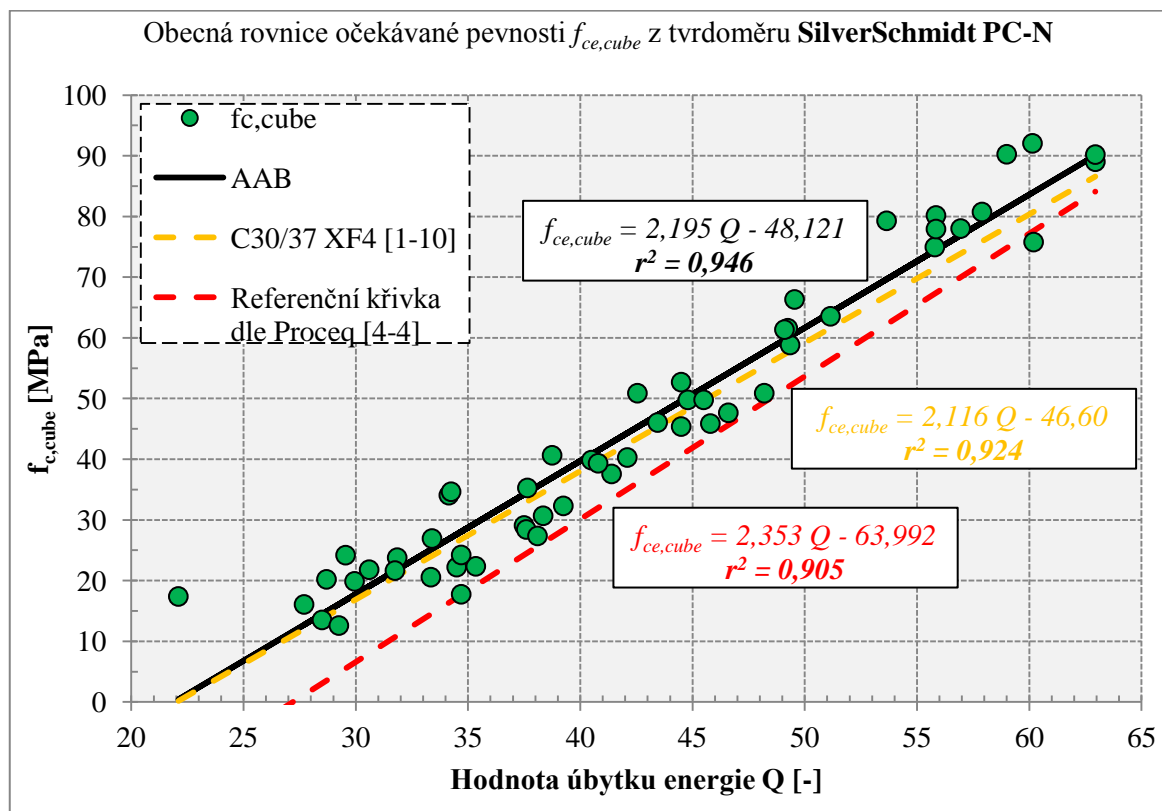
$X_2$  =  $Q$  ... hodnota podílu energií tvrdoměrem SilverSchmidtem PC N [-]

Po zadání vstupních údajů byly vytvořeny kalibrační vztahy opět pomocí funkce LINREGRESE, založené na metodě nejmenších čtverců, programem MS Excel.

Celkem se tedy jedná o dva obecné kalibrační vztahy, jejichž vstupní parametry představují hodnoty odrazu a úbytku energie tvrdoměry Schmidt N a SilverSchmidt PC-N. Pro porovnání, jsou výsledky regresního výpočtu graficky znázorněny pro každý tvrdoměr zvlášť v příslušných následujících grafech.



Graf 6-25 Stanovení obecné rovnice očekávané pevnosti v tlaku  $f_{ce,cube}$  z hodnot odrazu  $a_N$



Graf 6-26 Stanovení obecné rovnice očekávané pevnosti v tlaku  $f_{ce,cube}$  z hodnot úbytku energie  $Q$

Hned na první dojem je zřejmé, že SilverSchmidt PC-N má mnohem vyšší závislost a přesnost měření než Schmidt N. To pravděpodobně proto, že odrazový kvocient  $Q$ , získaný z podílů energií, je mnohem přesnější než mechanicky získaná míra odrazu  $a$ .

V Grafech 6-25 a 6-26 je uvedeno několik lineárních přímek (křivek):

Tučná černá přímka, vychází z naměřených hodnot experimentu a je vytvořená regresní analýzou. Představuje tak obecnou kalibrační křivku pro stanovení pevnosti AAB v tlaku tvrdoměrem Schmidt typu N (Graf 6-25) a SilverSchmidt PC-N (Graf 6-26).

Červená čárkovaná lineární přímka uvádí obecný kalibrační vztah pro stanovení pevnosti běžného betonu v tlaku. V případě Grafu 6-25 se jedná o pevnost v tlaku pro tvrdoměr Schmidt N (viz norma ČSN 73 1373). V případě Grafu 6-26 se jedná o smluvní referenční křivku stanovenou přetransformováním exponenciální rovnice udávané firmou Proceq pro tvrdoměr SilverSchmidt ST/PC-N [4-4].

Oproti kalibračním křivkám, stanovených experimentálně, se obě normové (červené) křivky liší svým průběhem. Průběh referenční a zejména obecné křivky výrazně podhodnocuje pevnost v tlaku, nejen pro alkalicky aktivovaný beton. Tento fakt dokazuje počáteční předpoklad, že není přesné v praxi aplikovat obecný kalibrační vztah v normě ČSN 73 1373 na moderní betony, jelikož byl tento vztah sestaven na betonech s nižšími pevnostmi, než kterou vykazují betony současné.

Dále je v grafech znázorněna (pouze pro představu a srovnání) oranžová čerchovaná přímka, která byla stanovena v bakalářské práci autora pro beton třídy C30/37 XF4 [1-10]. Tato představuje určující kalibrační vztah pro stanovení pevnosti betonu v tlaku tvrdoměry Schmidt N a SilverSchmidt PC-N.

V případě Grafu 6-25 je průběh této křivky v porovnání s křivkou AAB (černá plná) rovnoběžný, ale posunutý. Vypočtené hodnoty očekávané pevnosti AAB by mohly tudíž být dle křivky pro C30/37 XF4 (oranžová) navyšovány.

Naopak v Grafu 6-26 je průběh kalibračních křivek (oranžová čerchovaná a černá plná) pro tvrdoměr SilverSchmidt PC-N téměř totožný. To je velmi zajímavé a vzhledem k vysoké regresní závislosti křivky pro AAB ( $r^2 = 0,946$ ) to nasvědčuje tomu, že AAB mají velmi podobnou závislost mezi tvrdostí a pevností materiálu, jako beton třídy C30/37 XF4.

Pro využití experimentálně vytvořeného obecného kalibračního vztahu pro SilverSchmidt PC-N v praxi, by bylo vhodné posunout lineární křivku tak, aby 90% naměřených hodnot bylo umístěno nad křivkou a 10% naměřených hodnot pod křivkou jak udávají požadavky Eurokódu. Tím by se změnila rovnice regresní přímky a tudíž i hodnota počítané očekávané pevnosti  $f_{ce, cube}$ .

## 6.4 Kalibrační vztahy pro dynamický a statický modul pružnosti

Na úvod této kapitoly by chtěl autor upozornit na fakt, že tvorba kalibračních vztahů pro stanovení modulu pružnosti je pouze doplňková vzhledem k nízkému počtu zkušebních hranolů. Pro uplatnění těchto kalibračních vztahů v praxi by bylo tedy zapotřebí zvýšit počet zkušebních vzorků a podrobněji se věnovat pružnostním charakteristikám materiálu v závislosti na čase.

Dále je podstatné zmínit, že pro výpočet dynamického modulu z UZ vlnění již existuje výpočtový vztah (viz Kap. 2.1.1). Proto kalibrační vztahy pro dynamický modul vytvořené lineární regresí slouží pouze k ověření přesnosti měření.

Tvorba kalibračního vztahu pro stanovení očekávaného dynamického a statického modulu pružnosti v tlaku a tahu  $E_{bue}$ ,  $E_{ce}$  ze známých naměřených hodnot nedestruktivním i destruktivním způsobem je popsána v následujících řádcích.

K vytvoření určující kalibrační rovnice pro stanovení očekávaného dynamického modulu pružnosti betonu v tlaku a tahu  $E_{bue}$  bylo zapotřebí hodnot dynamického modulu vypočteného z naměřených údajů ultrazvukovým zařízením a odpovídající hodnoty rychlosti šíření ultrazvukového impulzu  $v_L$ . Výpočet byl proveden pomocí matematické analýzy lineární regrese, jejíž princip byl podrobněji popsán v Kapitole 4.2.2.

Při tvorbě kalibračního vztahu pro stanovení očekávaného statického modulu pružnosti  $E_{ce}$  se postupovalo obdobně avšak s malým rozdílem. Jako závisle proměnné se zvolily vypočtené hodnoty statického modulu pružnosti  $E_c$  [MPa] z deformací způsobených cyklickým zatěžováním v lise. Vektory nezávisle proměnných představovaly vstupní údaje získané z nedestruktivního měření ultrazvukem  $v_L$  [km/s].

S ohledem na to, že byly vyrobeny tři zkušební hranoly ve třech různých záměsích, proběhlo měření deformací pouze ve stáří 28 dnů. Proto tedy vstupní údaje sestávají z celkem  $3 \times 3 = 9$  hodnot statického modulu pružnosti ve třech různých záměsích a jim i odpovídajících rychlostí šíření UZ impulzu  $v_L$ . Tímto vzniká „obecný“ kalibrační vztah pro stanovení statického modulu pružnosti alkalicky aktivovaného betonu.

Jednotlivé hodnoty vstupních parametrů z nepřímého měření (nedestruktivního) a z přímého (destruktivního) měření a pro každou záměs zvlášť jsou uvedeny v předchozích Tabulkách 6-5 až 6-7.

#### 6.4.1 Stanovení očekávaného dynamického modulu pružnosti v tlaku, tahu $E_{bue}$

V této kapitole se opět pojednává detailněji o vytvoření kalibračního vztahu. Jak již bylo zmíněno, jedná se o stejný princip, který byl použit u stanovení kalibračního vztahu pro krychelnou pevnost betonu v tlaku, ale s patřičnými rozdíly. Závisle proměnnou hodnotu náhodné veličiny  $Y$  představuje tentokrát hodnota dynamického modulu  $E_{bu}$  vypočtená z rychlosti ultrazvukového impulzu  $v_L$ . Nezávisle proměnné hodnoty náhodného vektoru  $X$  představují vstupní parametry z nedestruktivního ultrazvukového měření a to samotná rychlost šíření UZ vlnění  $v_L$ .

**Vstupní údaje** (viz Tab. 6-5 až 6-7)

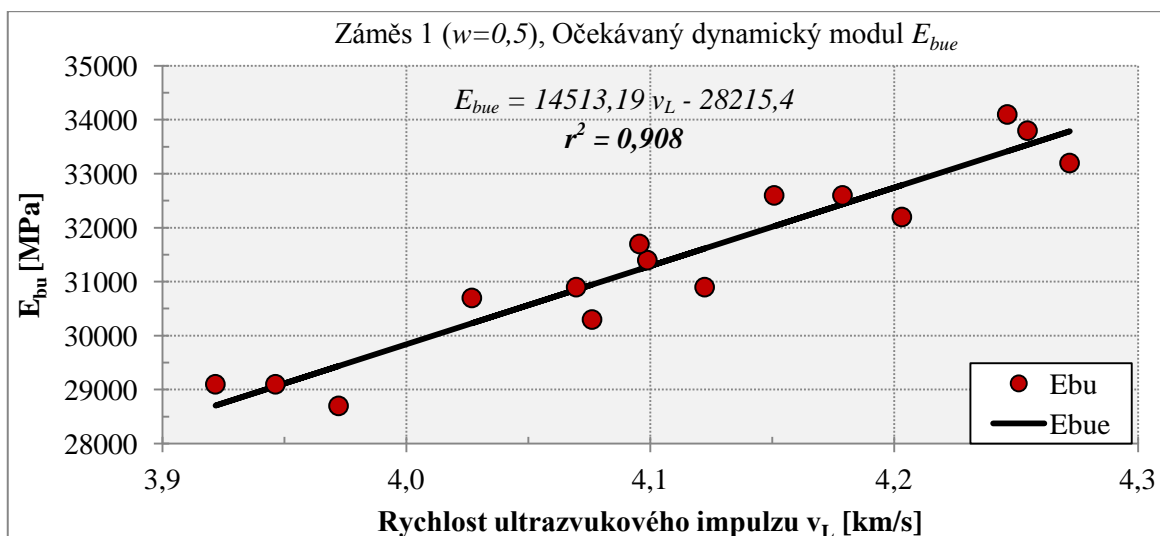
$Y = E_{bu}$  ... dyn. modul pružnosti v tlaku, v tahu získaný z měření UZ zařízením [MPa]

$X = v_L$  ... rychlost UZ vlnění [km/s]

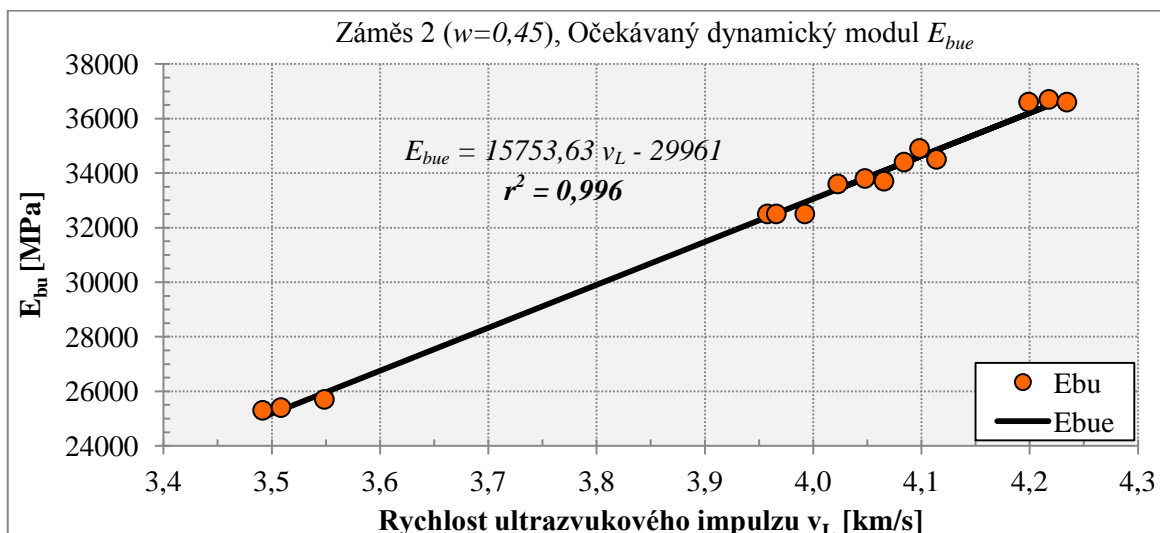
Po zadání vstupních údajů byly vytvořeny kalibrační vztahy opět pomocí funkce LINREGRESE, založené na metodě nejmenších čtverců, programem MS Excel.

Celkem se tedy jedná o tři určující kalibrační vztahy, jejichž vstupní parametry představují hodnoty dynamického modulu pružnosti a rychlost ultrazvukového vlnění ve třech záměsích.

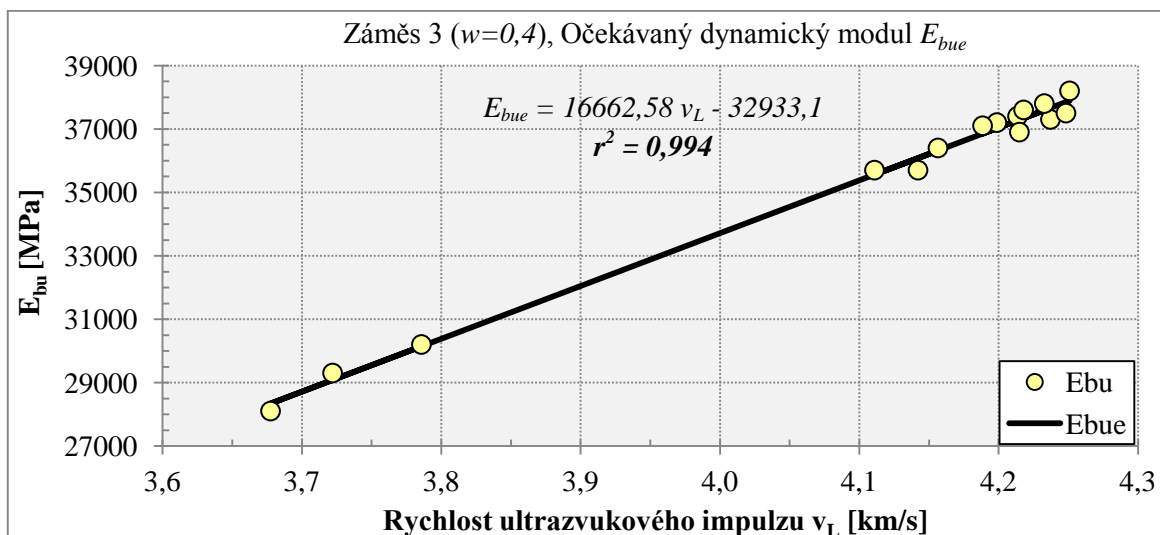
Výsledky regresního výpočtu jsou graficky znázorněny pro každou záměs zvlášť v následujících grafech.



**Graf 6-27** Výpočet očekávaného dynamického modulu pružnosti v tlaku, tahu  $E_{bue}$  z rychlosti UZ vlnění  $v_L$  pro  $w = 0,5$



**Graf 6-28** Výpočet očekávaného dynamického modulu pružnosti v tlaku, tahu  $E_{bue}$  z rychlosti UZ vlnění  $v_L$  pro  $w = 0,45$



**Graf 6-29** Výpočet očekávaného dynamického modulu pružnosti v tlaku, tahu  $E_{bue}$  z rychlosti UZ vlnění  $v_L$  pro  $w = 0,4$

Z Grafů 6-27 až 6-29 je patrné co bylo již řečeno úvodem této kapitoly a to, že regresní přímky ukazují, do jaké míry bylo měření UZ zařízením přesné.

Protože výpočet vychází z hodnot dynamického modulu, který byl stanoven z rychlostí UZ vlnění a zároveň jako druhý vstupující parametr do výpočtu je samotná rychlost UZ impulzu  $v_L$ , je tedy korelační součinitel výpočtu  $r^2$  téměř roven 1. Pouze v případě Grafu 6-27 je součinitel nižší a to pravděpodobně proto, že se ve zkušebních vzorcích již z počátku tvořily mikrotrhliny. Jedná se opět pouze o předpoklad a tato práce se tímto nadále nezabývá.

#### 6.4.2 Stanovení očekávaného statického modulu pružnosti v tlaku, tahu $E_{ce}$

Doposud, tak jako u krychelné pevnosti v tlaku, není nikde uvedena obecná kalibrační rovnice pro určení statického modulu pružnosti v tlaku a v tahu alkalicky aktivovaného betonu. Proto se nabízí možnost využít výsledků, které byly získány měřeními na třech záměsích lišících se ve vodním součiniteli ve stáří 28 dnů. Vzhledem k tomu, že se vychází z 9 + 9 vstupních parametrů, bude součinitel determinace  $r^2$  pravděpodobně výrazně nižší než 1, proto je nutno uvažovat výsledky s rezervou a spíše jako doplňkové.

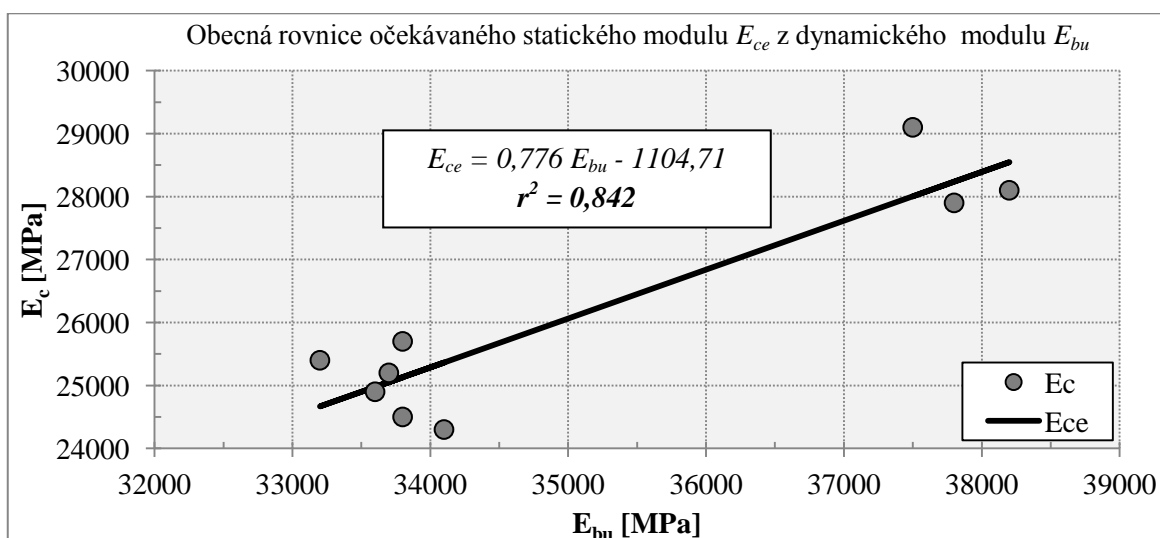
##### Vstupní údaje

$Y = E_c \dots$  statický modul pružnosti v tlaku, v tahu získaný z deformací cyklickým zatěžováním v tlakovém lise [MPa]

$X = E_{bu} \dots$  dynamický modul pružnosti získaný z rychlosti UZ vlnění [MPa]

Zadáním vstupních údajů se opět pomocí funkce LINREGRESE programem MS Excel, vytvořil obecný kalibrační vztah. Vstupními parametry jsou hodnoty dynamického modulu pružnosti  $E_{bu}$  ze tří záměsů.

Výsledek regresního výpočtu je graficky znázorněn v následujícím Grafu 6-30.



**Graf 6-30** Výpočet očekávaného statického modulu pružnosti  $E_{ce}$  z předem stanovených hodnot dynamického modulu  $E_{bu}$



Hodnoty statického modulu (viz Graf 6-30) v prvních dvou záměsích byly obdobné, zatímco třetí záměs vykazovala hodnoty výrazně vyšší. Zároveň výpočet lineární regrese sestával pouze z hodnot statického modulu 9 hranolů. Proto je součinitel spolehlivosti kalibrační křivky nízký, konkrétně 0,842.

Pro zpřesnění výpočtu by bylo zapotřebí většího množství zkušebních hranolů, minimálně srovnatelně s množstvím zkušebních krychlí, tj. 54 ks.

## 7 Výsledky zkoušek a měření IN-SITU

Tato kapitola pojednává o výpočtu očekávané krychelné pevnosti betonu v tlaku. Výpočet vychází z naměřených hodnot tvrdoměry Schmidt N a SilverSchmidt PC-N na betonových svodidlech a následným dosazením do „obecného“ kalibračního vztahu AAB. Teorie tohoto postupu je podrobněji popsána v Kapitole 5.2.3 a 6.3.3.

### 7.1 Naměřené údaje tvrdoměrnou odrazovou metodou

Naměřené hodnoty získané tvrdoměrným měřením na hrázových svodidlech a na svodidlech dosud neaplikovaných (uložených na stavebním dvoře) jsou uvedeny v tabulkách 7-1 a 7-2.

**Tab. 7-1** Hodnoty z NDT měření na hrázových svodidlech

Svo- dídlo	č. 1	č. 2	č. 3	č. 4	č. 5	č. 6	č. 7	č. 8	č. 9	č. 10	č. 11	č. 12	č. 13	č. 14	č. 15
Tvrd oměr	<i>Hodnoty odrazu a úbytku energie</i>														
<b>Schmidt N</b>	33	38	35	41	33	54	33	46	44	33	45	38	39	33	38
	39	39	43	45	33	53	35	48	46	36	47	38	45	33	41
	36	40	36	45	39	55	30	48	42	39	44	32	41	35	37
	39	39	40	42	40	52	34	48	48	41	44	38	42	35	40
	38	38	39	43	38	53	33	44	46	45	43	36	38	35	36
<b>Silver Schmidt PC-N</b>	49,5	50,0	56,0	56,0	44,5	75,0	46,0	58,5	63,0	55,0	61,5	53,0	58,5	44,5	52,0
	45,0	49,5	56,0	55,0	45,5	67,5	42,0	66,5	63,0	60,5	57,5	53,5	53,5	46,0	54,0
	46,0	49,0	57,0	55,5	50,5	72,0	48,5	65,5	65,5	59,0	60,0	54,5	56,5	48,0	56,0
	47,0	51,0	56,0	56,0	48,5	76,0	46,0	67,5	62,0	57,0	59,0	57,5	54,5	45,5	48,5
	48,0	49,5	56,0	57,0	44,5	71,5	44,5	54,0	60,5	59,0	59,0	54,0	55,0	47,0	50,0

**Tab. 7-2** Hodnoty z NDT měření na svodidlech dosud neaplikovaných

Svodidlo	č. 1	č. 1	č. 2	č. 2A	č. 2B	č. 3A	č. 3B	č. 3	č. 4
betonováno	9.11.	14.11.	14.11.	21.11.	21.11.	14.11.	14.11.	21.11.	21.11.
Tvrdoměr	<i>Hodnoty odrazu a úbytku energie</i>								
<b>Schmidt N</b>	39	38	36	45	44	40	40	39	43
	40	40	35	47	45	42	38	39	42
	40	40	39	43	47	42	36	40	40
	35	37	40	43	44	45	40	37	39
	38	41	40	49	45	41	37	38	41
<b>Silver Schmidt PC-N</b>	55,0	42,0	48,0	59,5	58,0	55,0	53,5	54,0	51,5
	51,5	47,5	51,0	60,0	60,5	51,5	52,0	55,5	53,5
	49,5	54,5	48,5	59,5	58,5	57,0	53,5	52,0	53,0
	51,0	46,5	50,0	58,0	61,5	51,0	55,5	47,0	52,5
	48,0	45,0	47,5	59,0	58,5	52,5	55,5	51,5	50,0

## 7.2 Stanovení očekávané krychelné pevnosti svodidel v tlaku

Při stanovení očekávané pevnosti v tlaku  $f_{ce,cube}$  se vycházelo z obecné kalibrační rovnice vytvořené v Kapitole 6.3.3 a to pro přístroje Schmidt N a SilverSchmidt PC-N. Tyto kalibrační vztahy byly vytvořeny z měření provedených na různých záměsích, o různém vodním součiniteli, a proto se o tomto vztahu s určitou rezervou může hovořit jako o obecném.

Vzhledem k dosaženým hodnotám tvrdoměrným měřením na svodidlech se nabízí možnost jej použít k získání orientační očekávané hodnoty krychelné pevnosti daného dílce (svodidla) a porovnat je s pevností AAB ve stáří 28 dnů (viz Tab. 7-5).

Vypočtené hodnoty očekávané pevnosti  $f_{ce,cube}$  pro oba tvrdoměry jsou uvedeny v Tabulkách 7-3 a 7-4. Je však nutné brát výsledky s určitou rezervou s ohledem na index spolehlivosti  $r^2$  v kalibrační rovnici (A), který je výrazně nižší než 1. Pro připomenutí jsou tvary kalibračních rovnic uvedeny níže.

A) Obecný kalibrační vztah pro tvrdoměr **Schmidt N**

$$\bullet \quad f_{c,cube} = 2,841 a_N - 45,104, r^2=0,809$$

B) Obecný kalibrační vztah pro tvrdoměr **SilverSchmidt PC-N**

$$\bullet \quad f_{c,cube} = 2,195 Q - 48,121, r^2=0,946$$

**Tab. 7-3** Vypočtená hodnota  $f_{ce,cube}$  pro jednotlivá hrázová svodidla v MPa z průměrných hodnot odrazu  $a_N$  a úbytku energie  $Q$

	č. 1	č. 2	č. 3	č. 4	č. 5	č. 6	č. 7	č. 8	č. 9	č. 10	č. 11	č. 12	č. 13	č. 14	č. 15
$f_{ce,cube}$ [MPa]	60,0	65,1	64,6	77,6	58,9	106,6	48,6	87,9	83,3	65,1	81,6	58,3	71,4	52,1	64,0
	55,3	61,2	75,2	74,6	54,4	110,8	51,5	88,8	89,7	79,4	82,3	71,5	73,9	53,3	66,2

**Tab. 7-4** Vypočtená hodnota  $f_{ce,cube}$  pro svodidla uložena ve stavebním dvoře v MPa z průměrných hodnot odrazu  $a_N$  a úbytku energie  $Q$

Svodidlo		č. 1	č. 1	č. 2	č. 2A	č. 2B	č. 3A	č. 3B	č. 3	č. 4
Datum betonáže		9.11.	14.11.	14.11.	21.11.	21.11.	14.11.	14.11.	21.11.	21.11.
$f_{ce,cube}$ [MPa]	$a_N$	64,0	66,3	62,9	83,9	82,7	74,2	63,4	64,6	71,4
	$Q$	63,8	55,3	59,4	81,8	82,3	69,1	70,4	66,0	66,2

**Tab. 7-5** Pevnost v tlaku  $f_{c,cube}$  svodidel uvedených v Tab. 7-4 ve stáří 28 dnů v MPa

Svodidlo		č. 1	č. 1	č. 2	č. 2A	č. 2B	č. 3A	č. 3B	č. 3	č. 4
Datum betonáže		9.11.	14.11.	14.11.	21.11.	21.11.	14.11.	14.11.	21.11.	21.11.
$f_{c,cube}$ 28 dní [MPa]		64,7	47,2	53,8	65,1	65,1	66,9	66,9	70	52,4

Výsledky očekávané krychelné pevnosti v tlaku  $f_{ce,cube}$  stanovené obecnou kalibrační rovnicí pro tvrdoměry Schmidt N a SilverSchmidt PC-N se mezi sebou liší, ikdyž v některých případech nepatrně. Tvrdoměr SilverSchmidt PC-N má vysokou závislost a přesnost měření, proto je možné uvažovat výsledky krychelné pevnosti stanovené tímto tvrdoměrem jako směrodatnější.

Vypočtená pevnost v tlaku  $f_{ce,cube}$  svodidel ve stáří dvou let od betonáže se pochopitelně liší v porovnání s pevností v tlaku měřenou ve stáří 28 dnů. Rozdíly nejsou pravidelné ale naopak kolísavé. U některých svodidel pevnost vzrostla a v jiných zase klesla. Tento jev je pravděpodobně způsoben tím, že svodidla byla vyrobena sice na bázi AAB ale s různým složením čerstvého betonu.

## 8 Závěr

Cílem této práce bylo vytvoření kalibračních vztahů pro stanovení vlastností alkalicky aktivovaných betonů. K tomu posloužila kombinace nedestruktivního a destruktivního zkoušení. Touto kombinací se ověřilo, který ze zvolených přístrojů nedestruktivního typu byl nejpresnější a do budoucna i nejvhodnější.

Betonovaly se tři různé záměsi s proměnným vodním součinitelem  $w$  = od 0,5 do 0,4. Díky tomu se dosáhlo dostatečného množství naměřených hodnot, pomocí kterých bylo možné stanovit kalibrační vztah nejen určující, ale i částečně obecný, pro výpočet krychelné pevnosti v tlaku  $f_{ce,cube}$ . Určení kalibračního vztahu pro výpočet statického modulu pružnosti  $E_{ce}$  bylo pouze orientační a doplňující. Pro přesnější formu této rovnice by bylo zapotřebí více zkušebních těles a tudíž i naměřených hodnot.

Redukce vodního součinitele ovlivnila především zpracovatelnost čerstvého betonu. Vzhledem k tomu, že se jedná o relativně nový stavební materiál, bylo by záhodno se touto skutečností v budoucnu podrobněji zabývat.

Dále se snížení vodního součinitele projevilo na vlastnostech materiálu v průběhu dozrávání, konkrétně na tvrdosti a pevnosti. S tím souvisí i přesnost měření jednotlivých přístrojů.

Zatímco se Schmidt typu L ze začátku jevil jako obstojný, postupně selhával v závislosti na redukci vodního součinitele. Nejlépe obstál tvrdoměr SilverSchmidt PC-N, který prokázal i oproti svému předchůdci Schmidt typu N vysokou závislost a přesnost při měření ve všech třech záměsích a to i v samostatném použití. Naopak ultrazvuk z hlediska přesnosti měření nevyhověl téměř vůbec.

Tvrdoměr Schmidt N udával hodnoty odrazu na zkušebních vzorcích AAB nižší a SilverSchmidt PC-N srovnatelné v porovnání s betonem na bázi portlandského cementu. Pevnost v tlaku AAB ve stáří 28 dnů byla naopak vyšší v porovnání s betonem třídy C 30/37 XF4 z bakalářské práce autora. Proto lze konstatovat, že alkalicky aktivované betony by mohly do jisté míry nalézt ve stavebnictví uplatnění.

Závěrem lze říci, že nedestruktivní tvrdoměrné metody, konkrétně SilverSchmidt PC-N, mohou být velmi užitečné. A to především v místech, kde potřebujeme ověřit vlastnosti konstrukce bez možnosti destruktivního zásahu anebo při zjišťování vlastností moderních druhů betonů.

## 9 Seznam použitých zdrojů

### 9.1 Skripta a opory

- [1-1] Hobst, L.; Adámek, J.; Cikrle, P.; Schmid, P., *Diagnostika stavebních konstrukcí - Přednášky*, , VUT v Brně, FAST, Brno, 2005
- [1-2] Anton, O., *Zkušebnictví a technologie Modul BI02-M04 Laboratorní cvičení*, , VUT v Brně, FAST, Brno, 2004
- [1-3] Anton, O., *Základy zkušebnictví*, , ISBN 80-214-2079-0, CERM s.r.o Brno, Brno, 2002
- [1-4] Adámek, J.; Hobst, L., *Stavební látky Modul BI01-M03 Beton*, , VUT v Brně, FAST, Brno, 2004
- [1-5] Adámek, J.; Hobst, L., *Stavební látky Modul BI01-M01 Struktura a vlastnosti stavebních látek*, , VUT v Brně, FAST, Brno, 2004
- [1-5] Stehlík, M., Koukal, J., Cikrle, P., Anton, O., Heřmánková, V., Schmid, P., Vítek, L., Vymazal, T., *Základy zkušebnictví*, , ISBN 80-214-2079-0, CERM,s.r.o. Brno, Brno, 2001
- [1-6] Karpíšek, Z.; *Regresní analýza*, , ÚM FSI v Brně, 2006
- [1-7] Jarušková, D., *Matematická statistika*, 2. vydání, Praha, Vydavatelství ČVUT, 1997.
- [1-8] Proceq manual, *Estimating Compressive Strength with SilverSchmidt*, EN 13791
- [1-9] Baumann\_VMPA Seminar *OriginalSchmidt SilverSchmidt\_2013-04-12* 2 slides
- [1-10] VRBA, Pavel. *Zjišťování pevnosti v tlaku a modulu pružnosti betonu nepřímými metodami: bakalářská práce*. Brno, 2011. 56 s. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Cikrle, Ph.D.

### 9.2 Normy

- [2-1] ČSN 73 1371:2011 *Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*
- [2-2] ČSN 73 1373:2011 *Nedestruktivní zkoušení betonu – Tvrdoměrné metody zkoušení betonu*
- [2-3] ČSN 73 1370:2011 *Nedestruktivní zkoušení betonu – Společná ustanovení*

### 9.3 Články

- [3-1] Cikrle, P.; Kocáb, D.; Vrba, P., *Kombinace nedestruktivních metod pro sledování vývoje vlastností betonu*, VUT v Brně, Brno, 2010
- [3-2] Vrba, P.; Bílek, V.; Topolář, L.; Pazdera, L., *Nedestruktivní zkoušení alkalicky aktivovaných betonů*, VUSTAH, 17. Mezinárodní konference, Telč, 2013
- [3-3] Puertas, F.; Palacios, M.; Gil-Maroto, A., *2nd International Symposium Non-Traditional Cement and Concrete*, Bílek, V., and Kersner, Z. (eds) 2005, Brno, pp. 69 - 82, ISBN 80-214-2853-8

### 9.4 www zdroje

- *www stránky*
- [4-1] *Concrete test hammer - SilverSchmidt PC-N*, 2013. Dostupné z WWW:  
<<http://www.silverschmidt.com/home/home.html>>  
čas 15:30, středa 17. 7. 2013
- [4-2] *Metoda nejmenších čtverců - definice*, 2013. Dostupné z WWW:  
<[http://cs.wikipedia.org/wiki/Metoda\\_nejmenších\\_čtverců](http://cs.wikipedia.org/wiki/Metoda_nejmenších_čtverců)>  
čas 16:20, čtvrtek 1. 8. 2013
- [4-3] *Lineární regrese - definice*, 2013. Dostupné z WWW:  
<[http://cs.wikipedia.org/wiki/Lineární\\_regrese](http://cs.wikipedia.org/wiki/Lineární_regrese)>  
čas 16:20, čtvrtek 1. 8. 2013
- [4-4] *The SilverSchmidt reference curve*, 2014. Dostupné z WWW:  
<[http://www.proceq.com/fileadmin/documents/proceq/products/Concrete/SilverSchmidt/The\\_SilverSchmidt\\_Reference\\_Curve.pdf](http://www.proceq.com/fileadmin/documents/proceq/products/Concrete/SilverSchmidt/The_SilverSchmidt_Reference_Curve.pdf)>  
čas 13:30, čtvrtek 2. 1. 2014
- *www obrázky*
- [4-5] *Letecký snímek města Újezd u Brna*, 2013. Dostupné z WWW:  
<<http://www.ujezdubrna.cz/fotogalerie-video/letecke-snimky-mesta2/>>  
čas 17:00, středa 9. 10. 2013



**10 Seznam použitých zkratk a symbolů**

$f_c$	Pevnost v tlaku [MPa]
$f_{c,cube}$	Krychelná pevnost v tlaku [MPa]
$f_{ce,cube}$	Očekávaná krychelná pevnost v tlaku [MPa]
$E_c$	Statický modul pružnosti [MPa]
$E_{ce}$	Očekávaný statický modul pružnosti [MPa]
$E_b$	Dynamický modul pružnosti [MPa]
$E_{br,L}$	Dynamický modul pružnosti z podélného kmitání frekvence [MPa]
$E_{br,f}$	Dynamický modul pružnosti z příčného kmitání frekvence [MPa]
$E_{bu}$	Dynamický modul pružnosti z podélné rychlosti UZ impulsu [MPa]
$a_L$	hodnota odrazu tvrdoměru Schmidt typu L [-]
$a_N$	hodnota odrazu tvrdoměru Schmidt typu N [-]
$Q$	hodnota úbytku energie tvrdoměru SilverSchmidt PC-N [-]
$v_L$	rychlost šíření UZ impulsu [m/s]
$\nu$	Poissonův součinitel [-]
$f$	frekvence použité ultrazvukové sondy [Hz]
$m$	hmotnost zkušebního vzorku [kg]
$V$	objem zkušebního vzorku [m <sup>3</sup> ]
$\rho$	objemová hmotnost zkušebního vzorku [kg/m <sup>3</sup> ]
$r^2$	součinitel determinace lineární regrese [-]

## 11 Seznam obrázků, grafů a tabulek

### 11.1 Seznam obrázků

- Obr. 2-1** Zvolený způsob prozvučování vzorku [1-1]
- Obr. 2-2** Kalibrace sond pomocí etalonu a měřicí zařízení PUNDIT
- Obr. 2-3** Způsoby rozkmitání tělesa – podélné  $f_L$ , příčné  $f_f$  a kroutivé  $f_T$
- Obr. 2-4** Schéma mechanismu uvnitř klasického Schmidtova tvrdoměru
- Obr. 2-5** Vzhled klasického Schmidtova tvrdoměru typ L, N
- Obr. 2-6** Elektronický tvrdoměr SilverSchmidt PC-N, energie rázu 2,207 J [1-9]
- Obr. 2-7** Schéma zdravé a zkarbonatované vrstvy v betonu
- Obr. 3-1** Ukázka zkoušky stanovení pevnosti v tlaku  $f_c$  [MPa]
- Obr. 3-2** Deformační diagram betonu v tlaku [1-2]
- Obr. 3-3** Ukázka zkoušky stanovení statického modulu pružnosti cyklickým zatěžováním hranolu o rozměrech 100/100/400 mm a záznamové zařízení
- Obr. 4-1** Měření metodou tvrdoměru a ultrazvuku na zkušební krychli a hranolu [3-1]
- Obr. 4-2** Grafické znázornění metody nejmenších čtverců [1-10]
- Obr. 5-1** Míchací zařízení o objemu 750 l
- Obr. 5-2** Ukázka forem pro zkušební krychle (*vlevo*) a uložení těchto forem po vyplnění betonem v laboratoři (*vpravo*)
- Obr. 5-3** Zhotovená zkušební tělesa zabalená v potravinářské fólii
- Obr. 5-4** Ukázka jednotlivých použitých NDT a DT metod při měření
- Obr. 5-5** Statická zatěžovací zkouška (*vlevo*) a tlaková zkouška hranolu (*vpravo*) ve stáří 28 dní
- Obr. 5-6** Místní rybník v městě Újezd u Brna [4-4]
- Obr. 5-7** Provádění NDT měření na hrázových svodidlech ▲▼
- Obr. 5-8** Provádění NDT měření na uložených svodidlech v areálu stavebnin ▲▼

## 11.2 Seznam grafů

- Graf 6-1** Vývoj krychelných pevností betonu v tlaku ve třech záměsích
- Graf 6-2** Vývoj dynamického modulu pružnosti betonu v tlaku i tahu ve třech záměsích
- Graf 6-3a** Průměrné hodnoty dynamických modulů pružnosti betonu stanovené rezonancí a průměrné hodnoty statického modulu ve třech záměsích
- Graf 6-3b** Hodnoty statického modulu pružnosti betonu ve stáří 28 dnů
- Graf 6-4** Výpočet očekávané pevnosti v tlaku  $f_{ce,cube}$  z hodnot odrazu  $a_L$  pro  $w = 0,50$
- Graf 6-5** Výpočet očekávané pevnosti v tlaku  $f_{ce,cube}$  z hodnot odrazu  $a_L$  pro  $w = 0,45$
- Graf 6-6** Výpočet očekávané pevnosti v tlaku  $f_{ce,cube}$  z hodnot odrazu  $a_L$  pro  $w = 0,40$
- Graf 6-7** Výpočet očekávané pevnosti v tlaku  $f_{ce,cube}$  z hodnot odrazu  $a_N$  pro  $w = 0,50$
- Graf 6-8** Výpočet očekávané pevnosti v tlaku  $f_{ce,cube}$  z hodnot odrazu  $a_N$  pro  $w = 0,45$
- Graf 6-9** Výpočet očekávané pevnosti v tlaku  $f_{ce,cube}$  z hodnot odrazu  $a_N$  pro  $w = 0,40$
- Graf 6-10** Výpočet očekávané pevnosti v tlaku  $f_{ce,cube}$  z hodnot ztráty energie  $Q$  pro  $w = 0,50$
- Graf 6-11** Výpočet očekávané pevnosti v tlaku  $f_{ce,cube}$  z hodnot ztráty energie  $Q$  pro  $w = 0,45$
- Graf 6-12** Výpočet očekávané pevnosti v tlaku  $f_{ce,cube}$  z hodnot ztráty energie  $Q$  pro  $w = 0,40$
- Graf 6-13** Výpočet očekávané pevnosti v tlaku  $f_{ce,cube}$  z UZ rychlosti  $v_L$  pro  $w = 0,50$
- Graf 6-14** Výpočet očekávané pevnosti v tlaku  $f_{ce,cube}$  z UZ rychlosti  $v_L$  pro  $w = 0,45$
- Graf 6-15** Výpočet očekávané pevnosti v tlaku  $f_{ce,cube}$  z UZ rychlosti  $v_L$  pro  $w = 0,40$
- Graf 6-16** Očekávaná pevnost v tlaku  $f_{ce,cube}$  z hodnoty odrazu  $a_L$  a UZ rychlosti  $v_L$  ( $w = 0,50$ )
- Graf 6-17** Očekávaná pevnost v tlaku  $f_{ce,cube}$  z odrazu  $a_L$  a UZ rychlosti  $v_L$  ( $w = 0,45$ )
- Graf 6-18** Očekávaná pevnost v tlaku  $f_{ce,cube}$  z hodnoty odrazu  $a_L$  a UZ rychlosti  $v_L$  ( $w = 0,40$ )
- Graf 6-19** Očekávaná pevnost v tlaku  $f_{ce,cube}$  z hodnoty odrazu  $a_N$  a UZ rychlosti  $v_L$  ( $w = 0,50$ )
- Graf 6-20** Očekávaná pevnost v tlaku  $f_{ce,cube}$  z odrazu  $a_N$  a UZ rychlosti  $v_L$  ( $w = 0,45$ )
- Graf 6-21** Očekávaná pevnost v tlaku  $f_{ce,cube}$  z hodnoty odrazu  $a_N$  a UZ rychlosti  $v_L$  ( $w = 0,40$ )

- Graf 6-22** Očekávaná pevnost v tlaku  $f_{ce,cube}$  z úbytku energie  $Q$  a UZ rychlosti  $v_L$  ( $w = 0,50$ )
- Graf 6-23** Očekávaná pevnost v tlaku  $f_{ce,cube}$  z úbytku energie  $Q$  a UZ rychlosti  $v_L$  ( $w = 0,45$ )
- Graf 6-24** Očekávaná pevnost v tlaku  $f_{ce,cube}$  z úbytku energie  $Q$  a UZ rychlosti  $v_L$  ( $w=0,4$ )
- Graf 6-25** Stanovení obecné rovnice očekávané pevnosti v tlaku  $f_{ce,cube}$  z hodnot odrazu  $a_N$
- Graf 6-26** Stanovení obecné rovnice očekávané pevnosti v tlaku  $f_{ce,cube}$  z hodnot úbytku energie  $Q$
- Graf 6-27** Výpočet očekávaného dynamického modulu pružnosti v tlaku, tahu  $E_{bue}$  z rychlosti UZ vlnění  $v_L$  pro  $w = 0,50$
- Graf 6-28** Výpočet očekávaného dynamického modulu pružnosti v tlaku, tahu  $E_{bue}$  z rychlosti UZ vlnění  $v_L$  pro  $w = 0,45$
- Graf 6-29** Výpočet očekávaného dynamického modulu pružnosti v tlaku, tahu  $E_{bue}$  z rychlosti UZ vlnění  $v_L$  pro  $w = 0,4$
- Graf 6-30** Výpočet očekávaného statického modulu pružnosti  $E_{ce}$  z předem stanovených hodnot dynamického modulu  $E_{bu}$

### 11.3 Seznam tabulek

<b>Tab. 6-1</b>	Záměs 1 ( $w=0,5$ ); rozměrové a fyzikální charakteristiky a pevnosti v tlaku $f_{c,cube}$
<b>Tab. 6-2</b>	Záměs 2 ( $w=0,45$ ); rozměrové a fyzikální charakteristiky a pevnosti v tlaku $f_{c,cube}$
<b>Tab. 6-3</b>	Záměs 3 ( $w=0,4$ ); rozměrové a fyzikální charakteristiky a pevnosti v tlaku $f_{c,cube}$
<b>Tab. 6-4</b>	Rozměrové charakteristiky trámů a hodnoty z měření rezonance ve 28 dnech
<b>Tab. 6-5</b>	Hodnoty dynamických a statických modulů pružnosti pro Záměs 1 ( $w=0,5$ )
<b>Tab. 6-6</b>	Hodnoty dynamických a statických modulů pružnosti pro Záměs 2 ( $w=0,45$ )
<b>Tab. 6-7</b>	Hodnoty dynamických a statických modulů pružnosti pro Záměs 3 ( $w=0,4$ )
<b>Tab. 6-8</b>	Vstupní parametry pro stanovení očekávané krychelné pevnosti v tlaku $f_{ce,cube}$ - Záměs 1, ( $w = 0,5$ )
<b>Tab. 6-9</b>	Vstupní parametry pro stanovení očekávané krychelné pevnosti v tlaku $f_{ce,cube}$ - Záměs 2, ( $w = 0,45$ )
<b>Tab. 6-10</b>	Vstupní parametry pro stanovení očekávané krychelné pevnosti v tlaku $f_{ce,cube}$ - Záměs 3, ( $w = 0,4$ )
<b>Tab. 7-1</b>	Hodnoty z NDT měření na hrázových svodidlech
<b>Tab. 7-2</b>	Hodnoty z NDT měření na svodidlech dosud neaplikovaných
<b>Tab. 7-3</b>	Vypočtená hodnota $f_{ce,cube}$ pro jednotlivá hrázová svodidla v MPa z průměrných hodnot odrazu $a_N$ a úbytku energie $Q$
<b>Tab. 7-4</b>	Vypočtená hodnota $f_{ce,cube}$ pro svodidla uložena ve stavebním dvoře v MPa z průměrných hodnot odrazu $a_N$ a úbytku energie $Q$
<b>Tab. 7-5</b>	Pevnost v tlaku $f_{c,cube}$ svodidel uvedených v Tab. 7-4 ve stáří 28 dnů v MPa